MATERIAL DIDÁCTICO
**INGENIERÍA**

**29**

# Diseño axiomático: Libro de Fundamentos y Aplicaciones


Aidé Aracely Maldonado Macías
César Omar Balderrama Armendáriz
Jorge Pedrozo Escobedo
Jorge Luis García Alcaraz




# DISEÑO AXIOMÁTICO

## Libro de Fundamentos y Aplicaciones

## *MATERIAL DIDÁCTICO*

Ingenierías

nº 29

Otros títulos de la colección

.

9. **Programación de proyectos**
   Joaquín Ordieres Meré
   1999, 96 pags. ISBN 84-95301-16-4

10. **Termodinámica fundamental (2ª ed.)**
    J. M. Sala Lizarraga, Luis M. López
    2000, 448 pags. ISBN 84-95301-25-3

11. **Termodinámica aplicada (2ª ed.)**
    J. M. Sala Lizarraga, L. M. López y Victor de la Peña
    2000, 584 pags. ISBN 84-95301-26-1

12. **Problemas Termodinámica fundamental (2ª ed.)**
    J. M. Sala Lizarraga, Luis M. López y Felipe Jiménez
    2000, 490 pags. ISBN 84-95301-27-X

13. **Problemas Termodinámica aplicada (2ª ed.)**
    J. M. Sala Lizarraga, Luis M. López y M.M: Ruiz de Adana
    2000, 432 pags. ISBN 84-95301-28-8

14. **Problemas de calor y frío industrial**
    L. M. López, J. M. Sala y J. M. Blanco Ilzarbe
    2000, 418 pags. ISBN 84-95301-29-6

15. **Apuntes de cartografía y proyecciones cartográficas**
    Jacinto Santamaría Peña
    2000, 74pags. ISBN 84-95301-30 X

16. **Apuntes de fotogrametría**
    Jacinto Santamaría Peña y Teófilo Sanz Méndez
    2000, 68pags. ISBN 84-95301-30-X

17. **Perspectiva: fundamentos y aplicaciones. Axonométrico. Caballera. Cónico**
    Ricardo Bartolomé Ramírez
    2000, 260 pags. ISBN 84-95301-33-4

18. **Problemas de resistencia de materiales. Nivel básico. Ingeniería agrícola**
    Eduardo Martínez de Pisón Ascacibar
    2001, 446 pags. ISBN 84-95301-44-X

19. **Sonometría y contaminación acústica.**
    Javier de Cos, J. Ordieres, M. Castejón, F. J. Martínez de Pisón
    2001, 384 pags. ISBN 84-95301-47-4

20. **Cuadernos de prácticas de informática industrial. Módulo 1: enunciados de prácticas en ensamblador**
    F. J. Martínez de Pisón, J. Ordieres, M. Castejón, F. J. de Cos, M. Gil.
    2001, 110 pags. ISBN 84-95301-58-X

21. **La oficina técnica y los proyectos industriales**
    F. J. Martínez de Pisón, J. Ordieres, M. Castejón, F. J. de Cos, E. P. Vergara, F. Alba.
    2 v. ISBN 84-95475-32-4

22. **Manual de prácticas de topografía y cartografía**
    Jacinto Santamaría Peña.
    115 págs. ISBN 84-689-4103-4

23. **Problemas de electrotecnia**
    José Fernando Azofra Catroviejo
    113 págs. ISBN 84-689-7232-0

24. **Tecnicas y algoritmos básicos de visión artificial**
    Grupo de Investigación EDMANS
    2006, 96 pags. ISBN 84-689-9345-X

25. **Prácticas de CAD 3D SolidEdge V18: I. Entornos de pieza, conjunto y plano**
    José Lafargue Izquierdo
    2008, 331 pags. ISBN 978-84-95301-29-6

26. **Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica**
    Grupo de Investigación EDMANS
    2009, 96 pags. ISBN 978-84-692-3007-7

27. **Ejercicios resueltos y explicados de circuitos monofásicos en régimen permanente senoidal**
    José Fernando Azofra Castroviejo y Diego Azofra Rojo
    2011, 211 pags. ISBN 978-84-694-8500-2

28. **Prácticas de mecanizado en torno y fresadora**
    A. Pernía Espinoza, J. Blanco Fernández, J. M. Sierra Soto, J. C. Azofra Rueda y F. J. Martínez de Pisón Ascacíbar
    2018, 73 pags. ISBN 978-84-697-5232-6

Aidé Aracely Maldonado Macías

César Omar Balderrama Armendáriz

Jorge Pedrozo Escobedo

Jorge Luis García Alcaraz

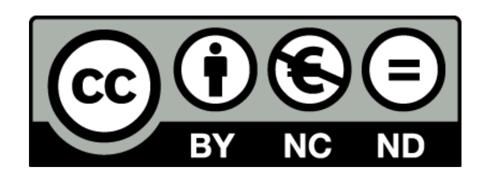
# DISEÑO AXIOMÁTICO

# Libro de Fundamentos y Aplicaciones

UNIVERSIDAD DE LA RIOJA
SERVICIO DE PUBLICACIONES
2019

DISEÑO axiomático [Recurso electrónico] : libro de fundamentos y aplicaciones / Aidé Aracely Maldonado Macías… [et al.]. - 1ª ed. - Logroño : Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2019.
v. digital (166 p.).- (Material didáctico. Ingenierías ; 29)
ISBN 978-84-09-10076-7
1. Diseño industrial. 2. Metodología. 3. Teoría de conjuntos. 4. Gestión de producto. I. Maldonado Macías, Aidé Aracely. II. Universidad de La Rioja. Servicio de Publicaciones. III. Serie
658.512.2
658.62.012
AKP – THEMA 1.0
TBD – THEMA 1.0

Esta obra ha superado un proceso de evaluación externa siguiendo el sistema de doble ciego antes de ser aprobada su publicación por la Comisión de Publicaciones de la Universidad de La Rioja, de acuerdo con la normativa de dicha Comisión.






Edita: Universidad de La Rioja. Servicio de Publicaciones

Diseño de portada: Universidad de La Rioja. Servicio de Comunicación

ISBN 978-84-09-10076-7

Dedicamos esta obra a nuestras familias, colegas,
maestros, estudiantes y colaboradores con quien
hemos compartido la experiencia de escribirla,
mejorarla y sobre todo nos motivaron a perseverar
hasta hacer de su publicación una realidad.

*Agradecimientos*

Agradecemos primeramente a Dios por la oportunidad de vivir esta enriquecedora experiencia.

Nuestra gratitud al Dr. Nam P. Suh, creador de la teoría de Diseño Axiomático, por su generosidad al escribir el prólogo de este libro; al Dr. Emilio Jiménez Macías por ser el vínculo con la prestigiosa Universidad de la Rioja; a Isabel Terroba por su valiosa intervención en este proceso de edición y sus oportunas sugerencias; al Dr. Jesús José Aguirre por introducirnos a esta interesante teoría; al Dr. Carlos Espejo Guasco, presidente y fundador de la Sociedad de Ergonomistas de México, por realizar la primera revisión de esta obra.

Además, nuestro agradecimiento al comité evaluador y revisor.

Gracias al equipo editorial de publicaciones de la Universidad de la Rioja, España.

# Índice

# FOREWORD

In the 21$^{st}$ century, "INNOVATION" has become one of the keywords in all fields of human endeavor, including technology, industry, education, economy, healthcare, and defense. Many nations depend on innovation as the foundation for economic growth, societal advancement, and political stability.

To innovate, we must first "design". The role of design is to *translate the perceived needs into solutions* in the form of hardware, software, systems, organizations, products, etcetera. Our ability to design rationally determines the quality and viability of the innovation. Poor or irrational designs may not yield desired solutions and products that satisfy the perceived needs. Furthermore, poor designs cost more to develop and even after many cycles of design/build/test iterations, may not satisfy its functional requirements (RF).

Human ability to *design*, *theorize, and manufacture* products and systems has been the basic foundation in advancing the human civilization throughout history, especially following the Industrial Revolution. Historically, design preceded the discovery of scientific principles (e.g., Newton's laws). Because of this historical precedent, for centuries, design has been done based on experience, intuition, and trial-and-error processes, which is then followed by Modelling and analysis of what has been designed for optimization and verification. Even today, some of these traditional practices persist in many companies, incurring extra expenses. Unfortunately, these traditional approaches may not yield good products and systems.

Design and innovation are particularly important in the 21$^{st}$ century, because there are many problems humanity must solve. Global warming, portable water, clean energy, sustainability, healthcare, eco-friendly transportation, automated manufacturing systems, food, and productivity are well known problems, for which we must devise solutions. The world needs designers who can translate the human needs into innovative solutions through the use of rational, reliable, and efficient design with minimum trial and error. Basic principles of Axiomatic Design can accelerate the design and development process by enabling designers to create systems that can satisfy human needs. These innovative products and processes that do not violate the design axioms are, in general, easier to implement and more reliable than empirically developed products and processes.

The purpose of Axiomatic Design (DA) is to enable designers to develop hardware, software, machines, processes, systems, and organizations rationally based on fundamental principles of design. DA is conceptually simple: only two axioms that govern all design practices. However, it does take a serious effort to understand and practice DA, although it is not difficult once the fundamental principles are fully understood and internalized.

This book on Axiomatic Design is most timely. This is the first DA book written in Spanish, although more people in the world speak Spanish than any other languages. This book should complement the DA books that were written in English, Chinese, Japanese, and Korean. This book is unique and expands the field of Axiomatic Design by including topics that have not been treated in other books. It should help students, engineers, and professionals in all fields to become proficient designers by learning how to design rationally, quickly, and inexpensively based on the design axioms.

This remarkable book on Axiomatic Design, written in Spanish, by Dr. Aide Maldonado-Macías, Dr. Cesar O. Balderrama, Dr. Jorge Pedrozo, and Dr. Jorge García-Alcaraz is an important contribution to the design field. People who learn Axiomatic Design theory based on this book should be able to develop innovative solutions in many diverse fields. I would like to offer my sincere congratulations to the authors

of this book for their excellent contributions and for their leadership in writing DA book in Spanish. Thanks to their effort, many people who have not been initiated in DA should find the field of design not only interesting but also intellectually rewarding.

Nam Pyo Suh

M. I. T.

Cambridge, MA 02139

U.S.A.

# 1. INTRODUCCIÓN

## PROPÓSITO DEL LIBRO

La visión de este libro consiste en presentar la tecnología metodológica del Diseño Axiomático (DA) como una herramienta de utilidad en las diferentes áreas del diseño, realizándolo de una forma en que se comprenda su relación con la práctica por medio de la diversidad de conocimientos en diferentes ramas de aplicación industrial. El conjunto de conceptos básicos para el entendimiento de la metodología es presentado de manera que pueda ser interpretado por estudiantes, maestros y profesionales que tengan el interés de introducir formas cuantitativas de evaluación de proyectos de fuentes de datos que comúnmente se consideran cualitativos.

Dentro de los perfiles básicos de la metodología se hace énfasis en el camino para la toma de decisiones en la selección de los mejores diseños, por lo que se pretende involucrar al lector en el uso de axiomas de información y de independencia como vehículos para apoyar en el difícil proceso de determinar el o los modelos que mayor cumplan con las necesidades del cliente, en donde la posibilidad de rediseño y mejora se encuentran disponibles. En su caso, se podrá aplicar en toma de decisiones desde el punto de vista administrativo

La forma en que se presentan los capítulos corresponde al deseo de que sean interpretados por personas con conocimientos mínimos en matemáticas, logrando dar a conocer el desarrollo realizado por el doctor Nam P. Suh en sus obras dedicadas al manejo de sistemas complejos mediante el uso del Diseño Axiomático.

## INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

Durante muchos años se ha presentado en el medio industrial y académico la necesidad de contar con formas que logren establecer un vínculo sistematizado entre el diseño creativo y la capacidad técnica de producir objetos. A pesar de que el primer libro de diseño axiomático (DA) se realizó en el año 2001, y su desarrollo mediante la experimentación y la publicación en obras de prestigio tiene más de quince años, su difusión se ha retrasado en el habla hispana. El presente capítulo tiene el propósito de presentar al DA como una herramienta aplicable al diseño organizacional, de procesos, de materiales y especialmente al diseño de productos industriales. Para lograr introducir al lector, se dan a conocer definiciones generales del diseño, así como las necesidades de contar con buenos diseños. Adicionalmente y como forma de contraste, se exponen otras metodologías (Mt) que pueden ser vinculadas o no al DA. Por último, se presenta un resumen del capítulo, exponiendo los principios originales que dan pie a la importancia de dar a conocer esta importante metodología.

El presente capítulo no pretende encajonar al diseño en una clasificación rigurosa de metodologías, sin embargo, se presentan algunas clasificaciones utilizadas en los contextos técnicos y de investigación. Posteriormente, se da a conocer una recolección de métodos comúnmente usados en las universidades e industrias para las actividades del diseño de productos, sin entrar en controversia con la forma en que debieran de clasificarse.

## CONCEPTO DE DISEÑO

Se podría considerar que el resultado de los procesos de diseño se encuentra en todos lados: si usamos un teléfono celular, si admiramos la belleza de un edificio, e incluso si paseamos por la calle en un automóvil. El diseño se encuentra incluido en todos los productos, procesos, instalaciones, obras de arte o en cualquier programa de computadora que utilicemos para realizar una tarea. El diseño forma parte de nuestra vida cotidiana y de él puede depender trabajar en forma eficiente o resolver un problema con mayor rapidez que nuestra competencia.

El término de la palabra diseño proviene del italiano *disegno*, que significa dibujar. Este término está asociado a la necesidad de resolver problemas de las personas por medio de la creatividad del dibujo plasmada en obras o productos. Podemos pensar que la mayor parte de los diseños actuales se encuentran en las disciplinas de la arquitectura o de la ingeniería, pero desde que el hombre empezó a construir cosas, el arte ha sido un área que ha realizado contribuciones importantes en la creación estética; incluso, el diseño industrial tiene sus orígenes en esta disciplina, a pesar de que se encuentra enteramente relacionada con procesos de manufactura en serie. Actualmente, a nivel administrativo se diseñan también procesos que incluyen el diseño desde el campo de la comunicación.

Desde la revolución industrial se han realizado innumerables definiciones para poder entender la actividad recién creada. El acto de diseño es difícil de conseguir y duro de describir, por lo que Christopher Jones en el año 1978, lo definía como la iniciación del cambio en las cosas hechas por el hombre. Archer (1965) lo definió como un trinomio entre una finalidad, un problema controlado, y una solución. Para Matchett (1968) fue la solución óptima a un conjunto de verdaderas necesidades en un particular conjunto de circunstancias.

Una de las escuelas más conocidas del diseño, la Bauhaus, propone que el diseño debe realizarse por medio de la investigación sistemática tanto teórica como práctica en los campos formal, técnico y económico; derivar la forma de un objeto a partir de las funciones naturales y sus delimitaciones. La naturaleza del objeto está delimitada por lo que hace. Para que un contenedor, una silla o una casa puedan funcionar apropiadamente se debe estudiar primero su naturaleza, puesto que deben servir perfectamente a su propósito; en otras palabras, debe funcionar prácticamente (Wingler, 1979).

A partir del diseño moderno se han conceptualizado definiciones partiendo de la perspectiva en que se utilice el diseño; incluso, algunos autores lo definen como una disciplina y otros como una profesión, de acuerdo con la generalidad en que se quiera abordar el concepto del conocimiento. Se han creado corrientes filosóficas para establecer en dónde empiezan y dónde terminan las actividades relacionadas con el diseño, basadas en considerar la parte estética o la parte funcional de los objetos. El concepto de diseñar a partir del estilo o la modernidad continúa proyectándose en muchas empresas.

Hoy en día, el diseño industrial se encuentra más vinculado a la tecnología que al arte y algunos lo definen como una actividad que se ocupa del diseño dentro de un marco estético, pero siempre teniendo en cuenta al hombre como usuario (Gay y Samar, 2007), mientras que otros proponen al diseño como el proceso por el cual los actos intelectuales se convierten en útiles objetos de diseño (Goncalves-Coelho y Mourao, 2007)

De acuerdo con la obra de Suh (1990), el diseño involucra interacción continua entre “lo que queremos obtener y cómo lo queremos obtener”. Por lo tanto, un riguroso enfoque de diseño debe empezar con una declaración explícita de “qué queremos lograr” y terminar con una clara descripción de “cómo lo lograremos”. Una vez que las necesidades del cliente han sido comprendidas, esta comprensión debe ser transformada en un conjunto mínimo de especificaciones que serán definidas como Requerimientos Funcionales (RF), que describen de manera adecuada “lo que queremos lograr” para satisfacer las necesidades del cliente. El descriptor de “cómo lograrlo” puede estar en la forma de Parámetros de Diseño (PD).

### Ejemplo 1.1. Los Requerimientos Funcionales

Considerando el caso del diseño de una silla para oficina, las **necesidades** del usuario podrían ser:

- Estar cómodo.

- Poder moverse fácilmente.
- Alcanzar a operar las herramientas de oficina.
- Poder trabajar largo tiempo sin molestias.

Los Requerimientos Funcionales serían entonces:

- Tener ajuste anatómico de espalda, glúteos y piernas.
- Tener ruedas de fácil movilidad.
- Poseer ajuste de altura del asiento.
  - Ajustar altura e inclinación del respaldo.
  - Proporcionar un suave soporte lumbar.

## ESTADO ACTUAL DE LA PRÁCTICA DE DISEÑO (SUH, 1990)

A partir de la revolución industrial, la ciencia y la tecnología han alcanzado un nivel sorprendente a un ritmo muy acelerado. El ser humano ha caminado sobre la luna, ha mandado sondas espaciales a otros planetas y está a punto de reducir la fisiología humana a bloques básicos de moléculas de ADN. Los chips de memoria pueden almacenar, en un solo dispositivo, la base entera del conocimiento científico que se disponía hace cien años. Estos son fabricados usando equipo que puede hacer que componentes electrónicos microscópicos se conviertan en pequeños chips de circuitos integrados (CI). Se trata de increíbles logros en lo científico y tecnológico. A pesar de estos y otros brillantes inventos, estamos rodeados por muchos problemas tecnológicos y sociales que han sido creados debido a la pobre práctica en el diseño.

Algunos errores de diseño son grandes problemas que han sido muy divulgados. Además, hay “pequeños” problemas que simplemente causan molestia a los consumidores. Los malos diseños o productos –grandes o pequeños– pueden ser peligrosos, costar dinero, limitar la utilidad de los productos o retrasar su introducción en el mercado. El costo de garantía de algunos productos es un porcentaje significativo del precio de venta. El equipo pobremente diseñado requiere mantenimiento y consume tiempo valioso, mientras que algunas fallas resultan en pérdida de propiedad y aún más importante, en vidas. Además, muchos proyectos pobremente concebidos y diseñados sufren de mayores demoras, costo sobre el presupuesto y, en algunos casos, fallan completamente. A pesar de que algunas de estas fallas son causadas por falta de conocimiento científico, la mayoría de estos problemas surgen debido a la forma en que se concibió el diseño del producto, el proceso, el software o el sistema.

Una razón por la que hoy en día se cometen muchos errores de diseño es que se está haciendo de manera empírica, a base de prueba y error. Este problema no está limitado a un país o compañía en particular, ya que existe en todos lados. Universidades alrededor del mundo no han dado a sus estudiantes de ingeniería un conocimiento generalizado, codificado y sistemático en diseño. En cambio, el diseño ha sido tratado como una materia que no es apropiada para el tratamiento científico. Como consecuencia, el diseño ha dependido del razonamiento intuitivo e innato en lugar de un estudio científico riguroso. Otro de los mayores retos en el campo del diseño es vencer la aceptación de concebir el diseño solo como una materia en artes en lugar de artes y ciencias. Afortunadamente, el campo del diseño no tiene que permanecer en esta etapa de empirismo. Igual que muchos campos de la tecnología han pasado por etapas similares de desarrollo, el campo del diseño, también, evolucionará y se convertirá en una verdadera disciplina con bases científicas.

Este libro está basado en los principios de diseño desarrollados por el Doctor Nam Suh (Suh, 1990), quien presenta un extenso tratado sobre una base científica para el diseño.

El diseño se ha definido en una gran variedad de formas dependiendo del contexto específico o el campo de interés. Los ingenieros mecánicos frecuentemente diseñan productos, y por lo tanto, cuando ellos dicen *diseño*, normalmente se refieren al diseño de un producto. Los ingenieros de manufactura, por el contrario, piensan en el diseño en términos de nuevos procesos y sistemas de manufactura (es decir, fábricas y células de manufactura). Para los ingenieros electrónicos, el diseño significa desarrollar circuitos análogos o digitales, sistemas de comunicaciones, o *hardware* de computadoras, mientras que los arquitectos de sistemas perciben el diseño en términos de sistemas técnicos u organizacionales, donde muchas partes deben trabajar juntas para producir un sistema que logre las metas definidas.

A pesar de que muchos ingenieros de software creen que su trabajo principal es escribir códigos de computadora, es difícil para ellos producir buen software, a menos que primero diseñen la arquitectura del *software*. Los administradores de negocios diseñan organizaciones para lograr metas organizacionales. Sobre una pequeña escala, los diseñadores de interiores seleccionan y organizan muebles y objetos decorativos para crear un ambiente adecuado para una casa o edificio. Aún el alcalde de nuestra ciudad debe diseñar una organización gubernamental eficiente y efectiva y desarrollar planes estratégicos para lograr su visión para la ciudad.

Todas estas son actividades de diseño, a pesar de que el contenido de estas actividades y el conocimiento requerido para lograr las metas pertenecen a campos específicos. A pesar de que cada campo utiliza diferentes bases de datos y diferentes prácticas, todos estos campos comparten muchas características de diseño. Lo que es común en estas actividades es que los diseñadores deban hacer lo siguiente:

- Conocer o entender las necesidades del *cliente*.
- *Definir el problema* que deben resolver para satisfacer las necesidades.
- Conceptualizar la solución mediante síntesis.
- Realizar *análisis* para optimizar la solución propuesta.
- *Revisar la solución de diseño resultante* para verificar si cumple con las necesidades originales del cliente.

*Una definición de diseño*: Diseño es una interacción entre *qué* queremos lograr y *cómo* queremos lograrlo. Esta interacción (o mapeo) es ilustrado en la figura 1.1 Por lo tanto, un riguroso enfoque de diseño debe empezar con una declaración explícita de qué queremos lograr y terminar con una clara descripción de cómo lo lograremos. Una vez que las necesidades del cliente han sido comprendidas, esta comprensión debe ser transformada en un conjunto mínimo de especificaciones, que serán definidas después como RF, que describen de manera adecuada lo que queremos lograr para satisfacer las necesidades del cliente. El descriptor de cómo lograrlo puede estar en la forma de Parámetros de Diseño (PD).

Frecuentemente, los diseñadores ven en la precisión de la descripción "¿qué queremos lograr?" una tarea difícil. Muchos diseñadores dejan deliberadamente sus objetivos de diseño de manera implícita en lugar de explícita y luego empiezan a trabajar en las soluciones de diseño sin haber definido antes de manera clara sus objetivos de diseño. Ellos miden su éxito comparando su diseño con los objetivos implícitos de diseño que tenían en mente, lo cual puede o no ser lo que el cliente buscaba. De esta manera, gastan una gran cantidad de tiempo mejorando e iterando el diseño hasta que la solución del diseño y "lo que ellos tenían en mente" coincide, lo cual, en el mejor de los casos, es un proceso que consume mucho tiempo. Para ser eficiente y generar el diseño que satisfaga las necesidades percibidas, el diseñador debe específicamente definir las metas del diseño en términos de "qué queremos lograr" y empezar el proceso de diseño. Las iteraciones entre "qué" y "cómo" son necesarias, pero cada iteración debe redefinir el "qué" de manera clara.

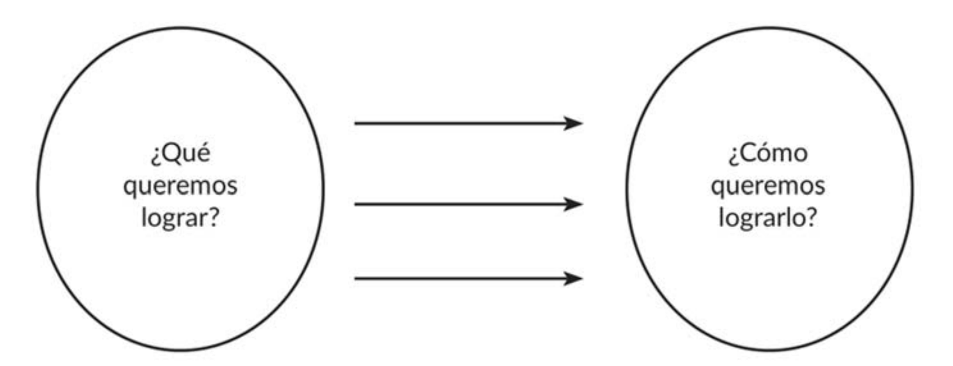



Figura 1.1. Definición de diseño como un mapeo entre "qué queremos lograr" y "cómo queremos lograrlo". Suh, 1990.

## APOYO EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS

Una de las claves en la creación de objetos corresponde al tiempo dedicado entre plantear el problema y cómo solucionarlo. Los desarrolladores de diseños hacen uso de su etapa creativa y de su experiencia para llevarlo a una feliz conclusión; desafortunadamente, algunos diseñadores suelen omitir los deseos del usuario y privilegian la satisfacción de sus sentidos. En las escuelas de educación superior, regularmente se utilizan técnicas desprendidas del método científico como una manera de organizar los procesos del diseño y concluir un trabajo de tesis. Aplicado de forma individualizada, el método puede ayudar a resolver problemas de diseño y a verificar el cumplimiento de objetivos, dando la libertad de usar herramientas metodológicas que auxilien en el proceso.

Algunos autores han categorizado los métodos de acuerdo con su función. Jones (1978) y Cross (1999) plantearon las etapas de diseño en divergencia, transformación y convergencia, clasificando los métodos en los siguientes grupos:

- Métodos de exploración de situaciones de diseño.
- Métodos de investigación de ideas.
- Métodos de exploración de la estructura del problema.
- Métodos de evaluación.

Yang (2010), clasifica algunos métodos con el nombre de Métodos Estructurados de Diseño, para realizar comparaciones en la toma de decisiones grupales e individuales de diseño. López-Mesa y Thomson (2006), usan el término *métodos divergentes* para relacionar los métodos que generan soluciones a problemas por medio de mejoras incrementales, y el término *métodos convergentes* para los métodos que evalúan, clasifican, proporcionan datos o dan peso, mientras que Alcaide *et al.* (2004) realizan una tipificación de metodologías y técnicas relacionadas con los procesos de diseño (ver figura 1.7).

La definición paso a paso para el desarrollo y la resolución del diseño es denominada *métodos proyectuales*. Desde 1963, Archer propuso pasos realizados por medio de listas de comprobación, considerando las siguientes actividades:

- Definición del problema.
- Obtención de datos.
- Análisis y síntesis de datos.
- Desarrollo de prototipos.
- Preparación de estudios y experimentos que validen el diseño.
- Preparación de documentos para la producción.

Posteriormente, Berhard Bürdek (1976) estableció un método con las siguientes variables:

- Información.
- Necesidades del usuario, aspectos funcionales.
- Exploración de posibilidades formales.
- Decisión.
- Cálculo. Normas y estándares de materiales y producción.
- Prototipo.

En la metodología proyectual manejado por Munari (1981), el cliente del diseñador es la industria; esta es quien le propone el problema, pero los diseñadores no deben buscar inmediatamente una idea general que resuelva enseguida el problema, porque esta es la manera artístico-romántica de buscar una solución. El problema no se resuelve por sí mismo, pero en cambio contiene todos los elementos para su solución; hay que conocerlos y utilizarlos en el proyecto de solución. Los problemas pueden ser detectados por el diseñador y propuestos a la industria o puede ser la industria quien proponga al diseñador la solución de un determinado problema. Sin embargo, muy a menudo la industria tiende a inventarse falsas necesidades para poder fabricar y vender nuevos productos. En este caso, el diseñador no debe dejarse comprometer en una operación realizada únicamente en provecho de la industria y en perjuicio del consumidor. Como propuesta al manejo de los diseños, Munari establece y explica cada uno de los pasos para dar solución a un problema de diseño (ver figura 1.2).

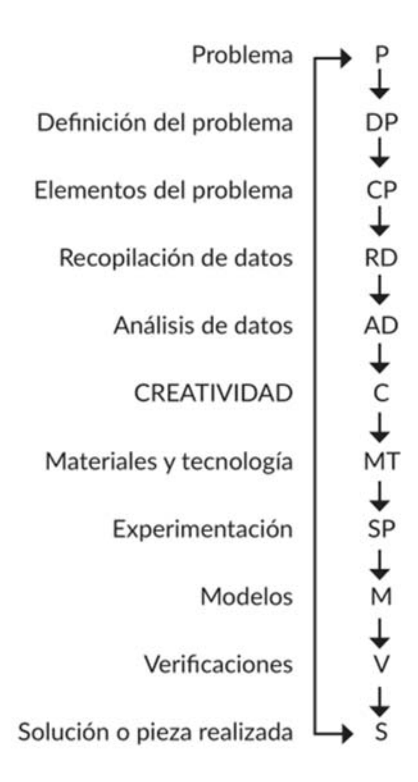



Figura 1.2. Metodología proyectual. Munari, 1981.

Como fase en el desarrollo de productos industriales, se requiere de la consideración de ciertos aspectos que le proporcionan competencia en el mercado.

Estos aspectos pueden ser catalogados en:

- Formales: dedicados a establecer los parámetros que debe poseer la estructura del objeto, incluyendo los materiales y sus propiedades.

- Estéticos: estos deben considerar las preferencias sensoriales de los usuarios finales.
- Funcionales: se refieren a que el diseño completará, sin fallar, las operaciones mecánicas, eléctricas, electrónicas o de software necesarias para su operación.
- Ergonómicos: el producto deberá brindar seguridad a la salud del usuario al momento de interactuar con él.
- De mercado: el producto debe ser competitivo económicamente y poseer cualidades para su comercialización.
- De manufactura: los componentes del producto deben poder ser producidos en serie en forma sencilla y con calidad.
- Sustentables: buscar que en la cadena productiva el producto utilice recursos en forma eficiente y responsable sin degradar el medio ambiente.
- De mantenimiento: los productos finales deberán requerir un nulo o un bajo mantenimiento para operar eficientemente durante periodos prolongados de vida.
- De uso: el manejo del producto por parte del usuario debe ser amigable, fácil de entender y no comprometer su salud.

Estos aspectos son parte importante en la determinación de los Requerimientos Funcionales, ya que no todos los aspectos se deben recolectar de los usuarios o de los clientes. El considerarlos puede asegurar en gran medida el desarrollo de buenos diseños.

## Ejemplo 1.2. Aspectos en el diseño de productos

Los aspectos en el diseño forman parte de los requerimientos con los que debe cumplir el producto terminado. Tomando como ejemplo el caso del diseño de una cuna para el descanso de bebés de cero a doce meses de nacidos, los requerimientos en los aspectos mencionados podrían ser:

- Formales: estructura rígida para soportar un bebé; espacio suficiente para que un bebé pueda descansar; ocupar espacio reducido en la recámara.
- Estéticos: el diseño debe denotar seguridad para el bebé; los colores deben proporcionar armonía a la vista.
- Funcionales: el bebé deberá poder colocarse y retirarse de la cuna fácilmente; la cuna se debe mover con facilidad de un lado a otro.
- Ergonómicos: la postura para acceder al bebé no debe comprometer la columna vertebral del adulto; el área de descanso debe procurar tener al niño boca arriba.
- De mercado: el costo de la cuna debe ser por debajo del costo de una cuna tradicional de madera; el empaque debe permitir un manejo y envío estándar.
- De manufactura: los materiales de construcción de la cuna deben poder adquirirse en la región; el proceso de fabricación debe permitir un alto volumen; la calidad final del producto debe ser viable de obtener.
- Sustentables: materiales renovables de bajo costo.
- De mantenimiento: el acabado de la cuna debe permitir una limpieza fácil; ninguna pieza de la cuna requiere de engrasado o reposición periódica.
- De uso: el producto debe de armarse con herramientas sencillas; debe ser fácil de empujar; las ruedas de desplazamiento podrán ser frenadas.

Los procesos del diseño no solo involucran actividades del diseño conceptual y del diseño de las especificaciones del producto, sino que se deben realizar actividades que van desde la identificación de las necesidades, pasando por el mercadeo, la fabricación, la venta y hasta la retirada del producto. Esto significa que al diseñar un producto se debe estar en contacto con todas las áreas de la compañía. En este sentido, existen diversas Mt en el ámbito industrial que han sido probadas y utilizadas por compañías importantes como forma de mejorar la calidad de sus productos.

Algunas técnicas, como el diseño de experimentos, ayudan a la elección del mejor diseño basado en las mejores respuestas que proporcione el producto, involucrando todas las variables conocidas. Las técnicas del doctor Genichi Taguchi evalúan la funcionalidad del producto durante etapas tempranas con la finalidad de ejercer cambios antes de que el costo se incremente, mejorando la integración del diseño del producto con los procesos de fabricación. Estas Mt resultan adecuadas para la mejora y control de la calidad y su aplicación es usada más eficientemente en procesos y productos ya existentes. El producto elaborado mediante diseño robusto debe ser insensible a los factores de ruido externos o a las tolerancias a que sea sometido el producto (Park *et al.*, 2006)

La teoría de resolución de los problemas inventivos (TRIZ, por sus siglas en ruso *Tieoriya Riesheniya Izobrietatielskij Zadach*) es otro método sistemático que puede usarse para incrementar la creatividad resolviendo problemas en forma estructurada. Su aplicación está más enfocada a la ingeniería y puede usarse para dar soluciones innovadoras en diseño, tomando en consideración que su objetivo es el manejo de la creatividad técnica y no la artística, aunque puedan estructurase bajo criterios estéticos. Análogamente, los métodos del diagrama de Ishikawa y el de lluvia de ideas también pueden ser herramientas específicas para definir problemas de diseño, sobre todo cuando se pretende conocer las causas directas, proporcionando información que nos lleve a concretar un diseño en forma eficiente. Por otro lado, la matriz de Pugh (conocida también como DATUM) es una herramienta que permite realizar comparaciones para encontrar diferencias; esta puede ser usada con la finalidad de determinar las mejores opciones entre varios diseños ya determinados.

Actualmente existen muchas estrategias de pensamiento para la generación de nuevos negocios y solución de problemas, que generalmente tienen su fundamento en formas de pensamiento lineal. El *Design Thinking* (DT) es un proceso creativo basado en la construcción de ideas. Aunque de manera general, el diseño se usa para describir un objeto. En este caso, es en realidad un proceso estructurado para obtener un resultado. A diferencia del pensamiento racional de otras disciplinas, como el pensamiento crítico, el dt es compartir valores que fueron inculcados en la formación profesional, lo que hace a los *design thinkers* ser lo que son y pensar como diseñadores, no como otra cosa. Entre estos valores que son motores de innovación, encontramos creatividad, pensamiento ambidiestro, trabajo en equipo, enfoque en el usuario final y curiosidad. Fundamentalmente, el dt invita a generar un nuevo modelo de pensamiento en las personas, más allá de ser simplemente una serie de pasos o metodología para lograr un resultado. El DT provee generalmente resultados que exceden las expectativas iniciales o que las sobrepasan. Por eso es una metodología atractiva y dinámica para que los negocios actuales la tomen para formar parte de su estrategia de innovación.

En la figura 1.3 se aprecian los seis pasos fundamentales del *Desing Thinking* (Cordero, 2011):

- Definir el problema: contribuye a comprender perfectamente cuáles son las restricciones, variables y constantes que tiene el asunto a resolver. Echar mano del trabajo en equipo, donde de manera preferente se buscan equipos diferenciados. A mayor diversidad de personas con capacidades y educación diferentes, mejor. Se trata de ver el problema desde diferentes ángulos, estilos de vida, etcétera.

- Observar: como parte de la búsqueda de información, antes de diseñar, basándose en la observación de los usuarios potenciales y las circunstancias alrededor del producto. Registros en video de los usuarios del producto, fotos de sus objetos personales y hasta escenas de su vida diaria en imágenes que muestran qué es lo que ven, son algunas de las maneras de obtener *insights* o información desde adentro de los usuarios.

- Sintetizar: lo que lleva a considerar todas las alternativas posibles de solución al problema, desde las más obvias hasta las más aventuradas, sin dar ninguna por hecho. Se trata de visualizar el futuro, lo que viene, no lo que ya hay.

- Prototipar: es uno de los pasos más importantes del proceso. Consiste en construir lo más rápido posible el producto o servicio pensado en tres dimensiones. Bocetos, maquetas, modelos de espuma, cartón y papel; todo se vale para tener una primera idea del producto, su volumen y cómo se percibe en escala real. Se trata de pasar del dibujo al objeto tridimensional. Se pueden prototipar con éxito ambientes, cuartos de hotel, bancos, aspiradoras o lo que sea que conlleve una experiencia humana.

- Iterar: hace referencia a repetir el ciclo hasta tener más información del usuario, usando el prototipo generado y haciéndole cambios, volviéndolo a probar con gente, volviendo a hacerle cambios, etcétera, hasta llegar a un diseño final. Esta parte es fundamental, ya que los cambios se hacen directamente sobre objetos que de alguna manera ya existen, y no sobre un documento o un dibujo que no se puede probar.

- Implementar: consiste en escoger la mejor opción con fundamentos probados, hacer lo necesario para poder producirlo, e implementarlo con éxito en el lugar o escenario donde se supone que el producto o servicio tendrá contacto con los usuarios.

- *Feedback* o retroalimentación: tratar de percibir si la solución logró sus metas, ver qué se puede mejorar y qué nos deja de aprendizaje para este proyecto en particular o para algún otro.

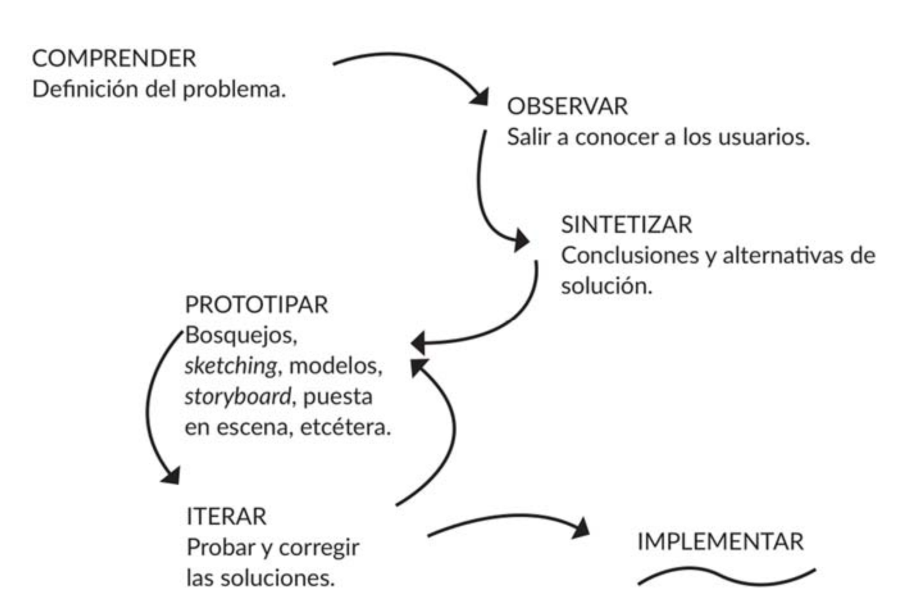



Figura 1.3. El pensamiento del diseño. Cordero, 2011.

De manera integral, se pueden reconocer algunas Mt que tratan de involucrar la mayor parte de las actividades del diseño de productos. El QFD (*Quality Function Deployment,* por sus siglas en inglés), o despliegue de la función de calidad, es un método originado para mejorar la calidad de los productos y procesos, en donde algunas de sus etapas resultan de gran ayuda al proceso de diseño. Este permite captar las demandas reales del mercado, plasmarlas como objetivos del diseño y conseguir que dichos objetivos permanezcan presentes a lo largo de todo el proceso. El QFD consta de cuatro etapas o casas, las cuales trabajan respectivamente en la mejora y optimización de las características de los productos, en las características técnicas de los componentes, la definición de los procesos de fabricación y, por último, en la definición del plan de calidad que proporcionará control y uniformidad en los productos. Cabe mencionar que la primera etapa del QFD puede ser de gran ayuda como auxiliar para la determinación de los atributos del cliente (AC) en el Diseño Axiomático (figura 1.4).

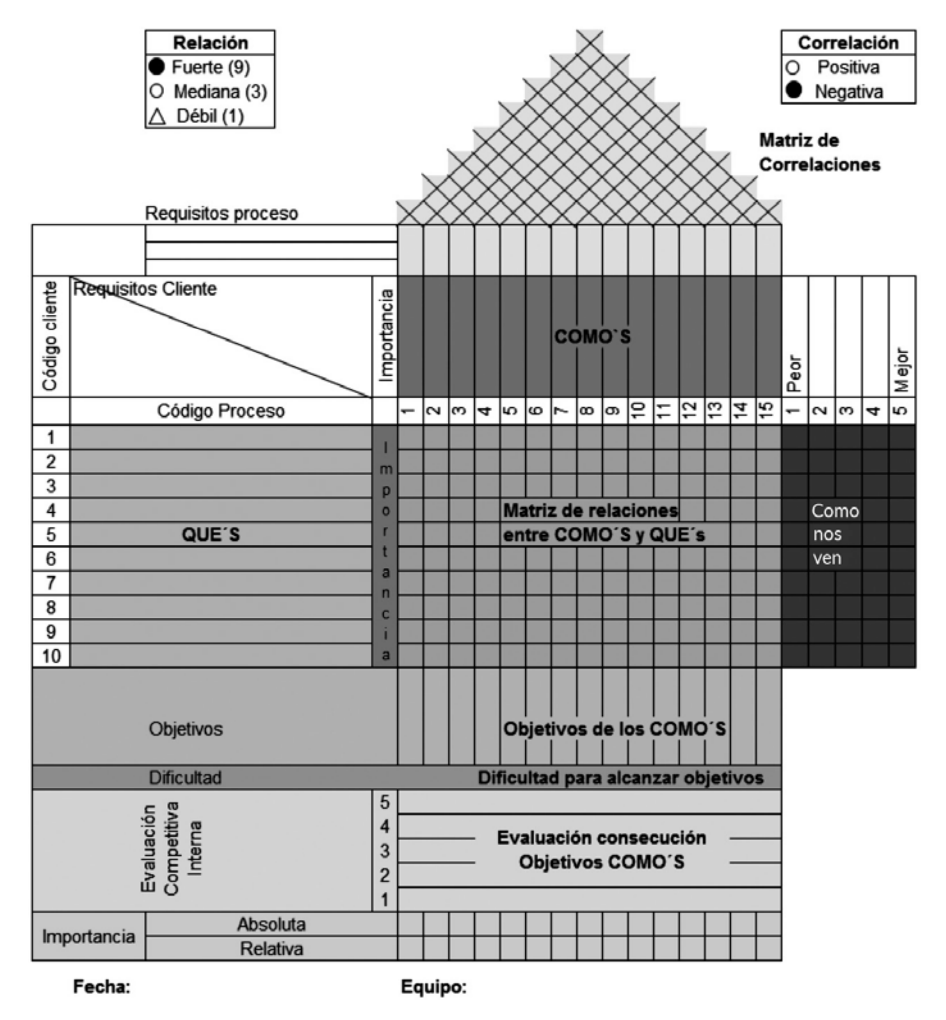



Figura 1.4. Matriz del QFD. Tomado de: http://calidad2fatyma.files.wordpress.com/2011/04/qfd.jpg.

Es buena idea empezar con un proyecto de mejora y no con el proyecto de desarrollo de un nuevo producto. Los proyectos de mejora tienen la ventaja de contar con información existente y cierta experiencia. Un nuevo equipo de QFD involucrado con un nuevo producto puede ser demasiada innovación a la vez. Con un proyecto de mejora, los miembros del equipo que pudieran estar no familiarizados con QFD están al menos familiarizados con el producto y con la información del cliente asociada al producto en cuestión. Esta familiaridad impide que se desarrolle una situación en la que los miembros del equipo están tratando de aprender acerca de QFD y de un nuevo producto simultáneamente.

Los principios de la ingeniería concurrente son aplicados por el término de diseño concurrente; esta metodología se considera una filosofía de trabajo basada en sistemas de información y fundamentada en la idea de convergencia, simultaneidad o concurrencia de la información contenida en todo el ciclo de vida de un producto, con el diseño del mismo. El diseño concurrente trata de establecer simultaneidad de tareas al abordarse en paralelo tanto el diseño del producto como el diseño del sistema de fabricación, los esquemas de montaje y embalaje, el plan de lanzamiento e incluso la obsolescencia. Hace uso de otras Mt como las de QFD, las técnicas de Taguchi y de las tecnologías de la información para completar todo el proceso del diseño. Similar a la ingeniería concurrente se encuentra el diseño para Seis Sigma (DPSS). Su objetivo es considerar los requerimientos del cliente y sus expectativas, integrando características de Seis Sigma a la salida por medio del desarrollo de herramientas como el TRIZ y el Diseño Axiomático.

En términos de considerar ampliamente las necesidades de los consumidores, existen sistemas que detallan la consideración de una mayor parte de la población. El diseño centrado en los usuarios o humanos fue popularizado por Norman (2013), manejándolo como una filosofía basada en los intereses

y necesidades de los usuarios, con énfasis en hacer productos más utilizables y entendibles y tomándolo como un enfoque que pone las necesidades humanas, capacidades y comportamientos en primer lugar; luego, diseña para dar cabida a esas necesidades, capacidades y formas de comportarse. En la figura 1.5 se puede ver una secuencia del diseño centrado en el usuario (Hodgson, 2008).




Figura 1.5. Diseño centrado en el usuario. Tomado de Hodgson, 2008

La Organización Internacional de Estandarización (ISO) lo retoma en varias ocasiones para producir la norma ISO 9241-210:2010 y definir al diseño centrado en el humano como un enfoque para el desarrollo de sistemas, describiendo seis principios clave (Travis, 2011):

- El diseño está basado en una comprensión explícita de usuarios, tareas y entornos.
- Los usuarios están involucrados durante el diseño y el desarrollo.
- El diseño está manejado y refinado por una evaluación centrada en los usuarios.
- El proceso es iterativo.
- El diseño está dirigido a toda la experiencia del usuario.
- El equipo de diseño incluye habilidades y perspectivas multidisciplinares.

Otras metodologías centradas en las necesidades de las personas son asignadas por medio del término *diseño universal*, definido como la aproximación a crear un medio ambiente que es accesible, entendible y aplicable a cualquier persona, independientemente de su edad, tamaño de cuerpo, habilidades u otras cualidades físicas. El diseño universal incluye las necesidades de gente discapacitada, pero alude a la interacción de la sociedad pública con el medio ambiente (Ulme, 2013). En forma análoga, el término *diseño inclusivo* (conocido en Europa como *diseño para todos*) es considerado como un enfoque general para el diseño en el que los diseñadores aseguran que sus productos y servicios respondan a las necesidades de la audiencia más amplia posible, independientemente de la edad o habilidad (Design Council, 2008). La figura 1.6 presenta los segmentos de población objetivo que pretende cubrir el diseño inclusivo (99 %).

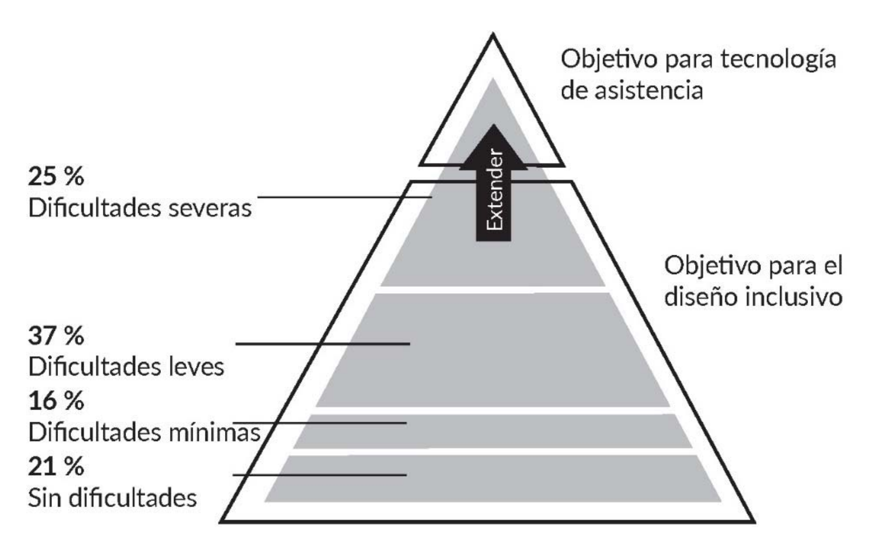



Figura 1.6. Objetivo de diseño inclusivo. Tomado de Hosking, Aller y Clarkson, 2010.

En relación con las diferentes metodologías, Alcaide, Diego y Artacho (2004) realizan una esquematización de diferentes Mt (metodologías) y cómo pueden relacionarse en las diferentes etapas del diseño del producto (figura 1.7).

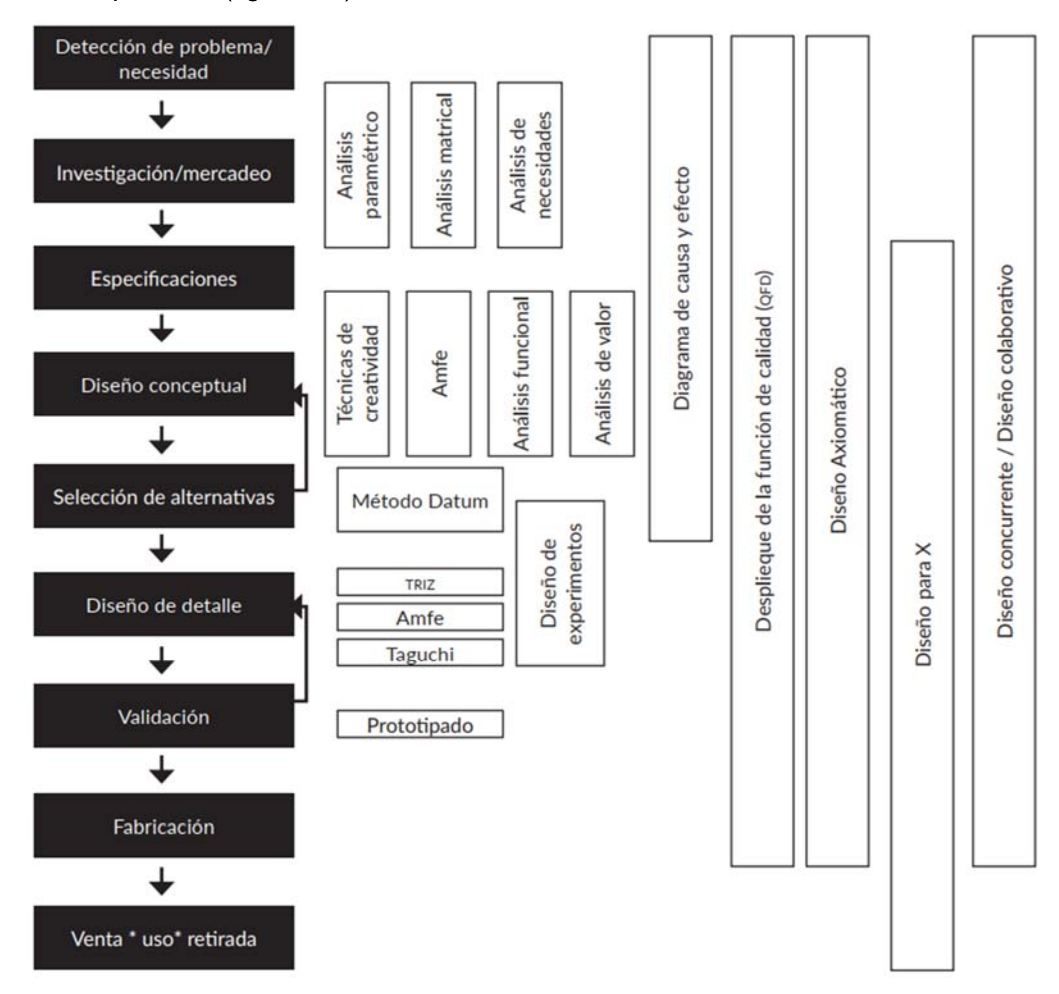



Figura 1.7. Metodologías en el diseño industrial y su aplicación en el proceso de diseño. Alcaide *et al*., 2004

De forma paulatina, el Diseño Axiomático (DA) se ha introducido en diversas actividades e incluso se considera parte fundamental de algunas Mt. En el libro de diseño para Seis Sigma de Yang y El-Haik (2003), se explica que la corona de su teoría del DFSS son los métodos de Diseño Axiomático y diseño robusto. Estos dos métodos, en conjunción con el resto de los elementos de su obra, proporcionan un método DFSS integral que permite a las empresas funcionar solo en el primer modo, que a su vez abre la puerta para mejorar drásticamente las actividades empresariales (productos y procesos) de una manera que minimiza residuos y recursos, al tiempo que aumenta la satisfacción del cliente. Se trata de un proceso que utiliza técnicas estadísticas y métodos conceptuales para conducir a los resultados por medio del complemento en la toma de decisiones. Diseños no acoplados y desacoplados tienen mayor potencial para lograr la capacidad de Seis Sigma en todos los requisitos funcionales que hacen los diseños acoplados. DFSS, en el sentido conceptual, se define como tener un diseño general no acoplado o desacoplado mediante la realización del mapeo del proceso y el mapeo físico, simultáneamente.

El diseño es una actividad intelectual y es por tanto difícil de entender o incluso describir el uso de teorías matemáticas debido a que toda actividad intelectual incluye la toma de decisiones. La toma de decisiones es una parte integral e inherente a cualquier proceso de diseño. Una variedad de herramientas, métodos y teorías se han desarrollado a través del tiempo para ayudar a describir y facilitar la toma de decisiones, y algunas de ellas han sido aplicadas a diversos aspectos de diseño, pero ninguna a una teoría general y útil para todas las áreas de diseño (National-Research-Council, 2001).

Como se puede entender en los párrafos anteriores, las Mt para el diseño industrial, más que competir unas con otras, se pueden complementar o combinar dependiendo de la complejidad del producto a diseñar. Por lo regular, aquellas Mt que abarcan varias de las etapas del proceso del diseño hacen uso de diferentes herramientas para lograr los objetivos establecidos. Aguayo y Soltero (2003), establecen que el objetivo de la ingeniería concurrente es el diseño y desarrollo de sistemas complejos. Si se desarrolla bajo la metodología QFD asistida por Diseño Axiomático, se tiene garantizado que la acción se lleva cabo de modo integrado y que se da cumplimiento en el diseño del producto y proceso de fabricación a un conjunto de axiomas y teoremas que constituyen el cuerpo formal de esta teoría del diseño. El DA tiene como objetivo conducir el proceso de diseño y desarrollo de producto que se puede integrar mediante otras técnicas y métodos, evitando el acoplamiento funcional y reduciendo la complejidad del producto y proceso de fabricación; tomando, por lo tanto, las decisiones correctas para obtener un diseño que satisfaga los Requerimientos Funcionales bajo los axiomas de independencia funcional y mínima información.

## RESUMEN

Dentro del marco referencial presentado en este capítulo podemos decir que el DA se posiciona como una metodología de relevancia en los procesos del diseño, en donde el común denominador es el establecimiento adecuado de las necesidades del cliente y el cumplimiento cabal de estas. La meta fundamental de esta metodología es establecer una base científica para diseñar y mejorar las actividades de diseño, ofreciendo al diseñador un fundamento teórico basado en el proceso de pensamiento lógico y racional.

Existen diversas metodologías enfocadas, por una parte, al diseño basado en la creatividad artística, y por otro, a cumplir con las especificaciones técnicas de ingeniería. En lo general, los procesos del diseño resultan similares; lo diferente se expresa en la forma en que se abordan los problemas y se proponen soluciones. Podemos enunciar metodologías como la Archer, Bürdek o Munari, que intentan poner un orden al desarrollo de un producto. Otros métodos ayudan en el proceso de resolución de problemas, como pueden ser el método TRIZ, la técnica de Ishikawa o, en su caso, el diseño de experimentos. Métodos de aplicación completa en el proceso de diseño, como lo son el diseño concurrente o el DFSS, se utilizan haciendo uso de otras metodologías que auxilian en el proceso. El QFD puede manejarse en forma creativa en casi todas las etapas del desarrollo del producto, pero es recomendado para productos o procesos existentes. Mientras que métodos centrados en las necesidades específicas de las personas, como el diseño universal o el diseño inclusivo, pueden ser

de gran apoyo para que todas las personas puedan disfrutar de un producto. El DA se puede usar como técnica auxiliar de otras metodologías o en forma independiente para la resolución de problemas.

Además, el objetivo del DA es variado: hacer a los diseñadores más creativos, reducir el proceso de búsqueda aleatorio, minimizar el proceso iterativo de prueba y error, determinar los mejores diseños entre los propuestos y dotar a la computadora de un poder creativo mediante la creación de una base científica para el campo del diseño. El DA mejora la creatividad. Requiere una formulación clara de los objetivos del diseño mediante la definición de RF y restricciones (RS). Identificando las Mt existentes que ayudan en los procesos del diseño, el DA cubre actividades que van desde la recolección de datos de los clientes hasta el diseño detallado del producto, pasando por la elección del mejor diseño de acuerdo con los criterios establecidos. El DA puede hacer uso del QFD en su primer dominio y ayudar en los procesos del diseño concurrente y del diseño para Seis Sigma.

## REFERENCIAS


AGUAYO, F., y Soltero, V. M. (2003). *Metodología del diseño industrial: un enfoque desde la ingeniería concurrente*. México DF: Alfaomega.

ALCAIDE, J., Diego, J. A., y Artacho, M. (2004). *Diseño de productos: métodos y técnicas*. México DF: Alfaomega.

ARCHER, B. (1963). Método sistemático para diseñadores. *Design*, vol. 64.

ARCHER, L. B. (1965). *Systematic method for designers*. Londres: Council of Industrial Design.

BÜRDEK, B. E. (1976). *Introducción a la metodología del diseño*. Buenos Aires: Nueva Visión.

CORDERO, R. (2011). Innovación: El design thinking como proceso de creación (vol. 2011): *Axeleratum*.

CROSS, N. (1999). *Métodos de diseño, estrategias para el diseño de productos*. México DF: Limusa.

DESIGN Council (2008). *Inclusive design education resource*. London UK: Design Council.

GONÇALVES-COELHO, A. M., y Mourao, A. J. (2007). Axiomatic design as support for decision-making in a design for manufacturing context: A case study. *International journal of production economics*, *109*(1), 81-89.

GUY, A., y Samar, L. (2007). *El diseño industrial en la historia*. Córdova Argentina: Ediciones teC.

HODGSON, D. (2008). Observo Luego Diseño. http://dhviejo.blogspot.com/2008/03/diseo-basado-en-el-usuario.html. (Tomado el 22 de septiembre del 2016).

HOSKING, I., Waller, S., y Clarkson, P. J. (2010). It is normal to be different: Applying inclusive design in industry. *Interacting with Computers*, 22(6), 496-501.

JONES, C. (1978). *Métodos de diseño*. Barcelona: Gustavo Gili.

LÓPEZ-MESA, B., y Thompson, G. (2006). On the significance of cognitive style and the selection of appropriate design methods. J*ournal of Engineering Design*, 17(4).

MATCHETT, E. (1968). Control of thought in creative work. *The Chartered Mechanical Engineer*, 14(4).

NORMAN, D. A. (2013). *The design of everyday things: revised and expanded edition*. Basic Books.

MUNARI, B. (1981). *¿Cómo nacen los objetos?* Barcelona: Gustavo Gili.

NATIONAL Research Council (2001). *Theoretical foundations for decision making in engineering design*. Washington DC: National Academies Press.

SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

PARK, G. J., Lee, T. H., Lee, K. H., y Hwang, K. H. (2006). Robust design: an overview. *AIAA Journal*, 44(1).

ULME, A. (2013). Universal Design and Sustainable Spatial Development. Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, 8(70).

WINGLER, H. M. (1979). *The Bauhaus Weimar, Dessau, Berlin, Chicago*. Cambridge, Mass: Londres: MIT Press.

YANG, M. C. (2010). Consensus and single leader decision-making in teams using structured design methods. *Design Studies*, 31(4).

YANG, K., y El-Haik, B. (2003). *Design for Six Sigma: a roadmap for product development*: New York: McGraw-Hill.

# 2. DISEÑO AXIOMÁTICO

## INTRODUCCIÓN A LOS PRINCIPIOS DE DISEÑO AXIOMÁTICO

Este capítulo contiene un resumen completo de los principios de Diseño Axiomático. Para ello se debe explicar los dominios, el proceso de mapeo, los axiomas, la descomposición jerárquica y el zigzagueo. Además, se enuncian los teoremas y corolarios. Debido a que es fácil ilustrar el concepto con casos de estudio de mecánica, muchos de los ejemplos en este capítulo son de naturaleza mecánica. Sin embargo, las ideas fundamentales del Diseño Axiomático son aplicables al diseño de software, diseño organizacional, diseño de material, diseño de procesos y sistemas de manufactura, entre otros.

### Ejemplo 2.1. Diseño del motor de gasolina de un automóvil

Considere el diseño del motor de un automóvil mostrado en la figura 2.1. ¿Es un buen diseño? Cada vez que se hace esta pregunta, se obtienen muchas respuestas diferentes. Algunos dicen que no es buen diseño por el bajo rendimiento en kilometraje. Otros dicen que es un buen diseño. Sin embargo, la pregunta no puede ser respondida sin antes preguntar: ¿Cuáles son las metas del diseño (es decir los Requerimientos Funcionales) para el diseño del motor del automóvil?

Si el propósito del motor es mover el auto, el diseño del motor es un buen diseño. Por el contrario, si los Requerimientos Funcionales del motor son (1) mover el auto, (2) maximizar el rendimiento de kilómetros por litro y (3) cumplir con requerimientos de emisiones, entonces el motor ya no es buen diseño, ya que continuamente el cliente está insatisfecho con el rendimiento y las compañías luchan por cumplir las normatividades de emisiones internacionales. El motor debe proponer un nuevo diseño para satisfacer estos tres Requerimientos Funcionales.

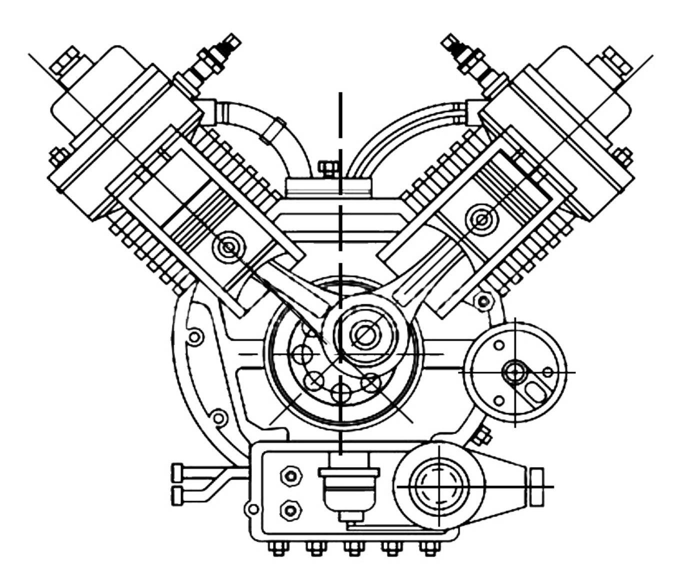


Figura 2.1. Motor de un automóvil. Tomado de: https://www.shutterstock.com/es/image-illustration/v8-car-engine-concept- modern-high-15279867.

Discusión: Considere algunos diseños alternativos dados los dos Requerimientos Funcionales y políticas.

¿Cuál es la meta fundamental del Diseño Axiomático?

¿Es posible que el campo del diseño sea científico? La meta fundamental del Diseño Axiomático es establecer una base científica para diseñar y mejorar las actividades de diseño para ofrecer al diseñador un fundamento teórico basado en el proceso de pensamiento lógico y racional, así como herramientas para ello. Considerando que las computadoras son ampliamente utilizadas en el diseño, es posible dotarlas de cierto poder creativo mediante la codificación de los axiomas de diseño y su descripción a través de su representación formal. Hoy en día, su uso se refiere principalmente a representaciones gráficas, modelado de sólidos, modelado de productos y optimización de soluciones de diseño. Debido a que las computadoras son cada vez más potentes y baratas –menor costo de memoria, procesamiento de números más rápido y menor tamaño físico– los diseñadores deben hacer uso de las computadoras como un dispositivo de almacén de información y como una herramienta para mejorar los diseños y aumentar la capacidad humana. Esto se puede hacer mediante la codificación y generalización del conocimiento del diseño. El resultado final de la investigación de diseño puede ser una máquina de diseño pensante que permita a las computadoras diseñar productos.

¿Se puede llegar a mejorar la creatividad mediante el Diseño Axiomático? Efectivamente, de acuerdo con Suh (2001), el Diseño Axiomático puede mejorar la creatividad, ya que requiere una formulación clara de los objetivos del diseño mediante la definición de Requerimientos Funcionales (RF) y restricciones (RS). El Diseño Axiomático proporciona criterios para decisiones sobre un buen y un mal diseño que ayuda a eliminar las malas ideas lo más pronto posible, capacitando a los diseñadores para concentrarse en aquellas más prometedoras. Además, el Diseño Axiomático formaliza el proceso de descomposición que permite un flujo sistemático desde la creación de conceptos hasta diseños detallados.

¿Es posible que la industria se beneficie mediante el establecimiento de una base científica para el diseño?

Existen razones intelectuales para desarrollar una base científica para el diseño, que han sido tratadas con anterioridad, pero también hay razones prácticas. El proceso actual de diseño puede llegar a ser tan intenso como inefectivo. El interés de las compañías en incrementar su competitividad, demanda una fuerte capacidad técnica en el diseño. Estas compañías requieren reducir el tiempo para la introducción de nuevos productos, reducir sus costos de manufactura, mejorar la calidad y confiabilidad de sus productos y satisfacer las funciones requeridas de manera efectiva. El mayor impacto sobre todas estas necesidades industriales estriba en la calidad y la oportunidad de desarrollar soluciones de diseño. Para lograr estas metas prácticas, se deben incrementar los ingredientes esenciales: diseñadores destacados, imaginación, conocimiento, experiencia y trabajo duro en combinación con la ciencia.

El campo del diseño está experimentando un renacimiento intelectual desde la noción de que el diseño puede ser aprendido solo con experiencia a la idea de que puede ser susceptible al tratamiento sistemático y científico para mejorar la creatividad y los elementos experimentales del conocimiento del diseño. Este renacimiento intelectual surge debido a que las buenas decisiones sobre el diseño no son tan aleatorias como aparentan ser, sino que son resultado de un razonamiento sistemático, cuya esencia puede ser capturada y generalizada para mejorar el proceso de diseño.

¿Cómo puede el Diseño Axiomático ayudar a otras disciplinas? El Diseño Axiomático (DA) puede ayudar en otras disciplinas de ingeniería, administración, entre otras. También puede hacer la tarea de controlar un sistema –hasta ahora, el dominio de la teoría de control– simple, confiable y sólido. La lección es la siguiente:

> *Hardware*, *software* y sistemas deben ser diseñados correctamente para ser controlables, confiables, que puedan fabricarse, ser productivos, y de alguna manera lograr las metas. El desempeño del *hardware*, *software* y sistemas pobremente diseñados rara vez puede ser mejorado mediante acciones correctivas subsecuentes.

# EL PAPEL DE LOS AXIOMAS EN EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA: UNA PERSPECTIVA HISTÓRICA

El uso de axiomas se adjudica históricamente a los griegos. Quizás el ejemplo más antiguo del uso de axiomas es la geometría de Euclides, la cual fue creada para medir distancias. De acuerdo con Suh (2001), su uso ha tenido fuertes efectos sobre la base matemática moderna para la manufactura, la navegación y casi todos los campos de la ciencia y la tecnología.

Los axiomas son verdades que no pueden ser derivadas y para los cuales no hay excepciones. Diversos campos de la ciencia y la tecnología deben sus avances al desarrollo y existencia de axiomas, desde las prácticas basadas en la experiencia hasta el uso de teorías científicas y metodologías que están basadas en ellos. En este sentido, el Diseño Axiomático sigue una tendencia histórica en el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

## El papel de los axiomas en la ciencia natural

Los axiomas han jugado un gran papel en el desarrollo de las ciencias naturales, que incluyen campos como la física, la química y la biología. Estas ciencias se ocupan de la energía, la materia, los organismos vivos y sus transformaciones e interrelaciones. En estos campos, los axiomas fueron más fácilmente aceptados porque las predicciones realizadas basadas en ellos pudieron ser comparadas con fenómenos naturales medibles cuantitativa y objetivamente.

Algunas leyes de la conservación de la energía, como la primera y segunda ley de la termodinámica, son axiomas. La primera ley de la termodinámica establece que la energía se conserva; se cree que es verdad porque no hay observaciones ni mediciones que contradigan a la ley o a las predicciones basadas en la ley. La primera ley define el concepto universal de energía para todos los tipos de diversas situaciones y materia. De manera similar, la segunda ley de la termodinámica no fue derivada. Es una generalización del comúnmente observado hecho de que ningún trabajo mecánico puede ser hecho por una máquina de vapor, al menos que intercambie calor con otros dos cuerpos. Este también es un axioma debido a que se cree que es una verdad universal para la cual no existen excepciones. Basados en la segunda ley de la termodinámica, se derivó el concepto de entropía. Se ha observado que las predicciones hechas con la segunda ley de la termodinámica han sido consistentes con las mediciones de los fenómenos naturales. El no intentar violar la segunda ley de la termodinámica ha sido exitoso. Por ejemplo, nadie, a la fecha, ha concebido una máquina de movimiento perpetuo.

El surgimiento y desarrollo de la disciplina científica de la termodinámica nació como resultado de los intentos por generalizar cómo trabajan las "buenas máquinas de vapor". Antes de que surgiera el campo de la termodinámica, mucha gente pudo haber dicho que el diseño de la máquina de vapor era muy difícil de explicar y que podría ser diseñada solo por diseñadores experimentados e ingeniosos y mediante procesos de prueba y error. Por ejemplo, diseños ya realizados han podido ser mejorados y transformados de esta manera. Asimismo, la máquina de bombear agua de Newcomen, en 1705, pudo ser mejorada a partir del descubrimiento de sus defectos por Watt en 1769. Isaac Newton (16421727) formuló tres leyes o axiomas para la mecánica y requirió de los tres axiomas para predecir las tres leyes del movimiento planetario de Kepler.

A pesar de que las leyes de Newton no pueden ser derivadas, tampoco existen contraejemplos a ellas. En otras palabras, las leyes de Newton son axiomas porque no pueden ser derivadas o probadas, pero no hubo excepciones hasta que Einstein presentó la teoría de la relatividad, la cual ha puesto un límite sobre las leyes de Newton. Ahora se sabe que las leyes de Newton son válidas cuando los efectos de la relatividad son pequeños.

Estos ejemplos muestran que el desarrollo de la ciencia natural ha sido posible debido a la adopción de importantes axiomas o leyes que pudieron generalizar el comportamiento de la naturaleza. La validez de estos axiomas es probada comparando las predicciones teóricas de fenómenos dados con mediciones experimentales para probar hipótesis basadas en estos axiomas, y mediante el análisis de fenómenos observados usando los axiomas.

La ciencia natural no está construida solamente con base en estos axiomas. También está construida sobre la base de otras leyes naturales y descubrimientos tales como la estructura de ADN y la naturaleza periódica de los elementos. Todas estas leyes, descubrimientos, y axiomas han propiciado el origen de la ciencia, la ingeniería y la tecnología.

## La influencia de la tecnología en la ciencia. El papel de los axiomas en el desarrollo de la ciencia a través del uso de la tecnología

Existen numerosos ejemplos donde los descubrimientos científicos han llevado al desarrollo de nuevas tecnologías. La moderna revolución de la biotecnología debe su existencia a la identificación de la estructura del ADN por Crick y Watson. Sin embargo, lo contrario también es verdad, pero no tan bien conocido: la tecnología frecuentemente ha precedido y llevado al establecimiento de disciplinas científicas. La termodinámica es un ejemplo bien conocido; también lo es la teoría de la información, la cual fue creada mediante un intento por sistematizar la tecnología de las comunicaciones. Ahora, la teoría de la información tiene muchas aplicaciones en muchos campos de la ciencia. El Diseño Axiomático es un ejemplo similar de cómo la tecnología del diseño ha llevado a la ciencia del diseño.

¿Cómo fueron creados los axiomas de diseño? Los axiomas de diseño fueron creados identificando los elementos comunes que están presentes en todos los buenos diseños. Las siguientes preguntas fueron planteadas por Suh para crear su teoría:

- ¿Cómo hice tal mejora en un proceso?
- ¿Cómo se creó el proceso?
- ¿Cuáles son los elementos comunes en los buenos diseños?

Una vez que los elementos comunes pudieron ser definidos, se redujeron a dos axiomas mediante un proceso de razonamiento lógico. La explicación histórica de cómo los axiomas de diseño fueron desarrollados a mediados de 1970 está dada en *The principles of design* (*Los principios del diseño)* (Suh, 1990).

## ENFOQUE AXIOMÁTICO COMPARADO CON EL ENFOQUE ALGORÍTMICO

¿Existe alguna otra manera de tratar el diseño? Para Suh (2001), hay dos formas de tratar con el diseño: axiomático y algorítmico. En un mundo ideal, el desarrollo del conocimiento debería proceder de axiomas a algoritmos a herramientas. Sin embargo, en años recientes muchos algoritmos han sido presentados *ad hoc* sin el beneficio de principios básicos.

En el diseño puramente algorítmico, se trata de identificar o prescribir el proceso de diseño. Así, al final el proceso llevará a la personificación del diseño que satisfaga las metas del diseño. Generalmente, el enfoque algorítmico está basado en la noción de que la mejor forma de progresar en el campo del diseño es entender el proceso de diseño siguiendo las mejores prácticas de diseño. El diseño algorítmico es adecuado para situaciones específicas. Por ejemplo, las técnicas de diseño para ensamble (DPE) y el diseño para manufactura (DPM) son métodos algorítmicos. Es difícil producir algoritmos de diseño para todas las situaciones, especialmente en el más alto nivel conceptual, y puede no ser deseable. Los algoritmos son generalmente útiles en el nivel de diseño de detalle, es decir, diseño para ensamble, porque son manejables.

Los métodos algorítmicos pueden ser divididos en las siguientes categorías:

- Reconocimiento de patrones
- Memoria asociativa
- Analogía

- Prescripción experimentalmente basada
- Extrapolación/interpolación
- Selección basada en la probabilidad

Algunos de estos métodos pueden ser efectivos si el diseño tiene que satisfacer solo un requerimiento funcional, pero cuando se deben satisfacer varios al mismo tiempo, pueden perder su efectividad. Los axiomas indican las fronteras dentro de las cuales los algoritmos son válidos, además de proporcionar los principios generales.

El enfoque axiomático empieza con esta premisa diferente: existen principios generalizables que gobiernan el comportamiento fundamental del sistema que se estudia. El enfoque axiomático está basado en la abstracción de las decisiones y procesos del buen diseño. Como se mencionó anteriormente, los axiomas son principios generales o verdades autoevidentes que no pueden ser derivadas o probadas como verdad, pero para los cuales no existen excepciones. Los axiomas generan nuevos conceptos abstractos tales como fuerza, energía, y entropía, que son resultado de las leyes de Newton y de las leyes de la termodinámica.

El enfoque axiomático para el diseño es poderoso y tendrá muchas ramificaciones debido a la generalización de los axiomas, a partir de los cuales se pueden derivar teoremas y corolarios. Estos teoremas y corolarios pueden ser usados como reglas de diseño que prescriben precisamente los límites de su validez porque están basados en axiomas. Los axiomas de diseño se aplican a muchos tipos de problemas.

¿Cuál es la relación entre el proceso de diseño y los axiomas de diseño? En muchos campos del aprendizaje, tanto el proceso de cómo algo es hecho y la abstracción que puede generalizar, los principales principios son igualmente importantes. Por ejemplo, cuando se enseña a los niños la noción de los números, se hace contando los dedos desde el pulgar hasta el meñique, pero se usan los dedos y otros objetos para enseñar la noción de los números mediante la abstracción del proceso de contar. En diseño también se necesita hacer la abstracción y el proceso. Se necesita enseñar el proceso y el concepto abstracto, tanto la teoría de lo que es un buen diseño como el camino para desarrollar buenos diseños.

## LOS FUNDAMENTOS DE DISEÑO AXIOMÁTICO (DA)

En diseño axiomático (DA) existen conceptos clave que son fundamentales. Por ejemplo, la existencia de los dominios, el mapeo, los axiomas, descomposición y zig-zag, entre otros. El DA requiere guiar el pensamiento, primero, funcionalmente, antes de considerar los atributos físicos o parámetros del sistema o producto que se desea diseñar. Aquí se hace énfasis en los siguientes conceptos: dominios, mapeo, zig-zag, RF, PD y axiomas.

¿Qué es el Diseño Axiomático? En esta teoría, el Diseño Axiomático (DA) provee base científica para el diseño de sistemas de ingeniería y ha sido utilizada para variados propósitos de diseño, como son:

- Proveer una forma sistemática de diseñar sistemas complejos y productos.
- Exaltar la creatividad del diseñador.
- Reducir procesos de búsqueda azarosa en las soluciones de diseño.
- Minimizar el proceso iterativo de ensayo y error.
- Determinar el mejor diseño entre aquellos que hayan sido propuestos.
- Crear una arquitectura de sistemas que capture por completo la construcción de sus funciones y provea su documentación adecuada y oportuna.
- Encontrar soluciones de diseño eficientes a partir del uso apropiado de la computadora.

## Definiciones

¿Es importante agregar definiciones de las palabras clave en DA? Antes de proceder con la explicación de los fundamentos de DA, es importante proporcionar la definición de algunas palabras clave discutidas en las secciones anteriores, ya que los axiomas son válidos solo dentro de los límites establecidos por las definiciones de estos términos clave. Tal como las palabras 'calor' y 'trabajo' tienen significados únicos en termodinámica, que son diferentes a aquellos de uso diario, así es el caso de las palabras clave usadas en Diseño Axiomático.

Las definiciones son las siguientes:

- Axioma: Verdad autoevidente o verdad fundamental para la cual no hay contraejemplos o excepciones. Un axioma no puede ser derivado de otras leyes o principios de la naturaleza.
- Corolario: Inferencia derivada de axiomas o de proposiciones que se siguen de axiomas u otras preposiciones que han sido probadas.
- Teorema: Una proposición que no es autoevidente pero puede ser probada a partir de axiomas o premisas aceptados y así ser establecido como una ley o principio.
- Requerimientos Funcionales (RF): Conjunto mínimo de requerimientos independientes que caracterizan completamente las necesidades funcionales del producto (o *software*, organizaciones, sistemas, etcétera) en el dominio funcional. Por definición, cada RF es independiente de los demás RF al momento en que estos son definidos.
- Restricciones (RS): Son fronteras sobre las soluciones aceptables. Hay dos tipos: restricciones de entrada y restricciones del sistema. Las restricciones de entrada son impuestas como parte de las especificaciones del diseño. Las restricciones del sistema son restricciones impuestas por el sistema en el cual la solución del diseño debe funcionar.
- Parámetros del diseño (PD): Son las variables físicas clave (u otros términos equivalentes en el caso de diseño de *software*, etcétera) en el dominio físico que caracteriza el diseño que satisface los RF especificados.
- Variables de proceso (VP): Son las variables clave (u otro término equivalente en el caso de diseño de *software*, etcétera) en el dominio que caracteriza el proceso que puede generar los PD especificados.

La mayoría de las palabras clave listadas están asociadas con el axioma de independencia. Definiciones adicionales asociadas con el axioma de información serán dadas en secciones más adelante. La significancia de estas definiciones debe ser más clara mediante ejemplos.

## Mapeo y axiomas

La teoría del DA está basada en axiomas, teoremas y corolarios. Esta teoría establece que todos los buenos diseños cumplen con dos axiomas (Suh, 2001).

1. El axioma de independencia: Mantener la independencia en todos los Requerimientos Funcionales (Suh, 1990).
2. El axioma de información: Minimizar la información en el contenido del diseño (Suh, 2001).

El axioma de independencia establece que los RF deben ser siempre independientes de otros, seleccionando el apropiado PD. Cabe mencionar que, durante la actividad del diseño, los PD son concebidos de los RF. Esta asociación es mapeada en una matriz de diseño. En ella, los RF son representados como líneas, mientras los PD como columnas. La relación entre un RF y un PD se representa como un elemento no-cero tal como muestra la ecuación 2.1. Un elemento en dicha matriz de diseño igual a cero corresponde a un PD no relacionado con un RF (Suh, 2001).

$$\begin{Bmatrix} RF1 \\ RF2 \\ RF3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1 \\ PD2 \\ PD3 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 2.1

El proceso de mapeo entre los dominios puede ser expresado matemáticamente en términos de vectores característicos que definen las metas y soluciones del diseño. Para un nivel de jerarquía del diseño dado, un conjunto de RF que define la meta del diseño constituye el vector RF en el dominio funcional. De igual manera, el conjunto de Parámetros de Diseño (PD) en el dominio físico que son seleccionados para satisfacer un RF constituye el vector PD. La relación entre estos dos vectores está dada por la ecuación 2.2 (Suh, 2001).

$$\{RF\} = [A]\{PD\}$$ Ecuación 2.2

Donde [A] es llamada la matriz de diseño del producto. La ecuación 2.3 es una matriz de diseño para un diseño que consta de tres RF y tres PD (Suh, 2001).

$$[A] = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}$$ Ecuación 2.3

La independencia de un RF se puede ver y medir con la matriz de diseño. Esta matriz puede asumir tres configuraciones básicas con respecto a la independencia de los RF, estas configuraciones son: no acoplado, desacoplado y acoplado. La matriz de diseño no acoplado representa un diseño con RF independientes, es decir, que cada RF se satisfaga con un PD único; este tipo de diseño satisface el axioma de independencia y se puede considerar un buen diseño. La matriz de diseño desacoplado contiene coeficientes ($A_{ij}$) superiores o inferiores que representan diseños desacoplados, lo que no es ideal, pero es una solución aceptable, ya que tiende a tener control en la independencia. La matriz de diseño acoplado se obtiene cuando al menos un mapeo está acoplado, es decir, que los RF se satisfacen con un PD único,$_{ij}$ lo que representa un diseño malo e inaceptable, ver figura 2.2 con las diferentes configuraciones de matrices (Pedrozo, 2010).

$$\begin{bmatrix} A11 & 0 & 0 \\ 0 & A22 & 0 \\ 0 & 0 & A33 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} A11 & 0 & 0 \\ A21 & A22 & 0 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}$$

Diseño no acoplado — Diseño desacoplado — Diseño acoplado

Figura 2.2. Matrices de diseño en el enfoque axiomático.

El proceso de DA se concentra en la satisfacción de los RF. Estos describen las metas del diseño mientras que los PD son los “cómos” del diseño que satisfacen un RF específico (Suh, 1990).

En la teoría del DA, la actividad de diseño se ve como un proceso de zigzagueo en el cual los RF son descompuestos en una estructura jerárquica. Para cada nivel de jerarquía, los PD son creados para satisfacer los RF y las relaciones entre ellos son mapeadas dentro de la matriz de diseño. Este proceso puede ser visualizado en la figura 2.3 (Pedrozo, 2010).

Cuando una solución no satisface los axiomas, es considerado como un diseño malo y el proceso de diseño no debe continuar. En la tabla 2.1 podremos ver los elementos que comprenden el enfoque del Diseño Axiomático: axiomas, estructuras y procesos (Suh, 2001).

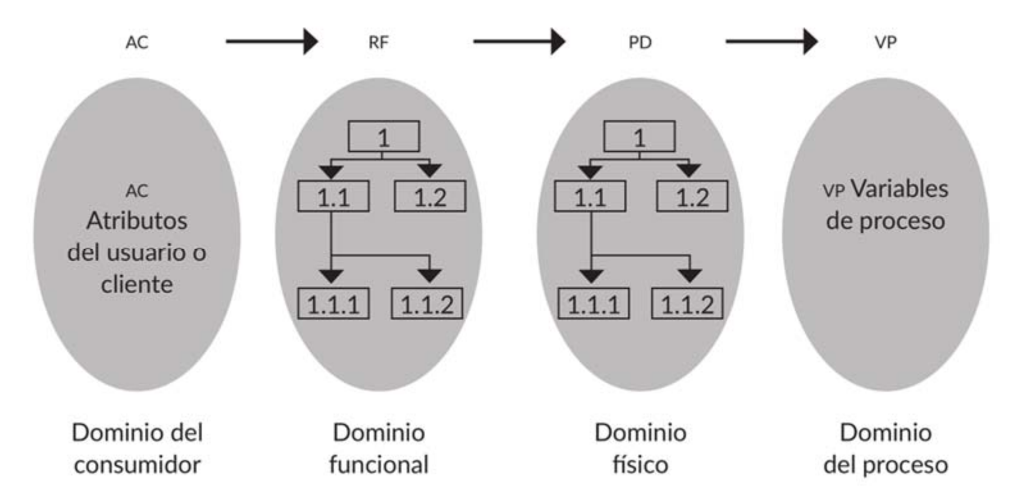



Figura 2.3. Proceso de zigzagueo entre dominios.

Tabla 2.1. Los tres elementos básicos del Diseño Axiomático.

| Elementos | Componentes | Detalles | Notas |
|---|---|---|---|
| Axiomas | Máxima independencia | No acoplar los elementos funcionales | Proveer facilidad de control y ajuste |
| | Mínima información | Maximizar la probabilidad de éxito | Proveer robustez y buena eficiencia |
| Estructuras | Lateral | Dominio del diseño | Usuario-funcional-físico-proceso |
| | Vertical | Jerarquía en el dominio | Descomposición de los general a lo particular |
| Proceso | Zigzagueo | Descomposición | Generación de herencias verticales |
| | Integración física | | Construcción dentro de sistemas físicos |

Los axiomas se descomponen en dos reglas que gobiernan el diseño. Estas dos reglas fueron mencionadas al inicio de este capítulo. En la figura 2.4 podremos ver cómo las estructuras se descomponen lateralmente en los dominios del diseño y verticalmente en las jerarquías del diseño (Pimentel y Stadzisz, 2006).

Los procesos consisten en la descomposición (zigzagueando) entre los dominios del diseño al nivel más fundamental de la jerarquía del diseño e integración física del diseño final. Esto lo podremos ver en la figura 2.5. La descomposición lateral es llamada “el campo de juego del diseñador”; y los axiomas, corolarios y teoremas son llamados “las reglas” (Brown, 2005). Mientras que los dominios son regularmente presentados como los dominios del consumidor y del proceso, el ejercicio del diseño se concentra en las relaciones entre los RF y los PD en los dominios funcionales y físicos. El dominio del proceso se utiliza para verificar si existe un proceso de manufactura razonable y variables en el proceso (Suh, 2001).

Definir apropiadamente los RF es esencial para un buen diseño. Los ingenieros tienden a saltar inmediatamente a la comprobación de los PD, abordando problemas del diseño. El resultado, frecuentemente, es que el RF no está bien definido, por lo tanto, se presentan algunas pautas para estos requisitos en la tabla 2.2 (Brown, 2005).

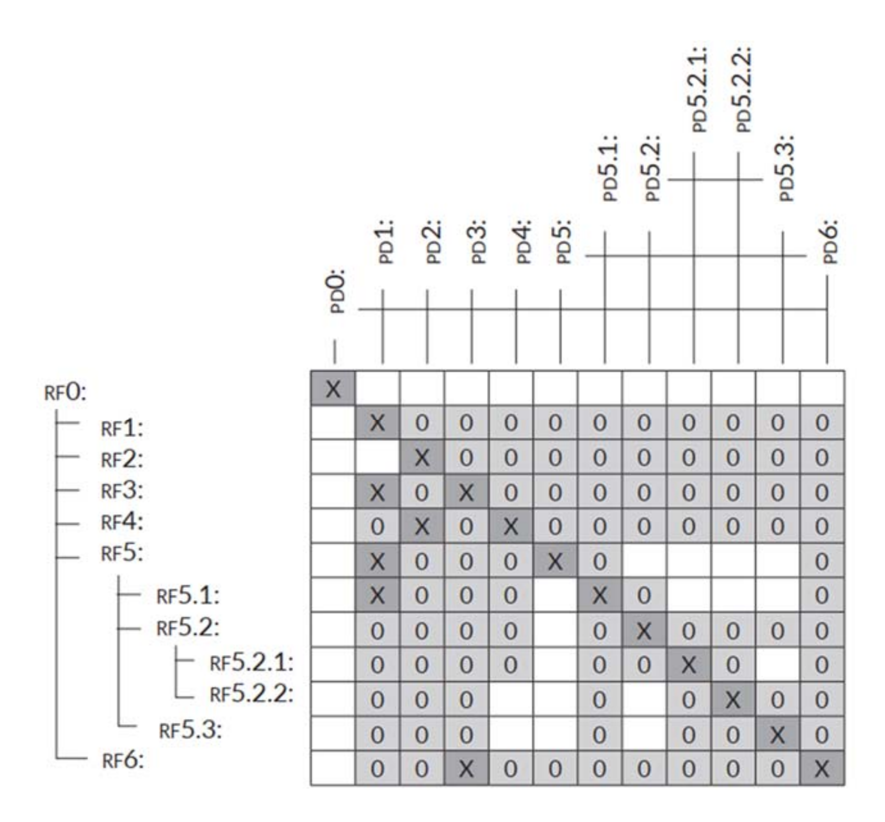



Figura 2.4. Descomposición vertical/horizontal de la MD.

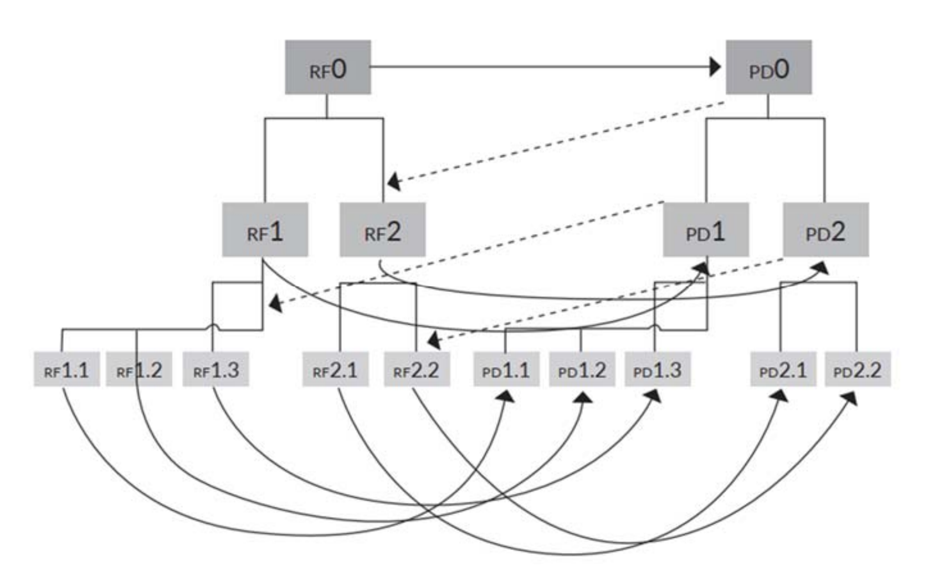



Figura 2.5. Proceso de zigzagueo entre los RF y PD.

Tabla 2.2. Pautas para definir propiamente los RF.

| **Requerimientos Funcionales RF** | **Parámetros del diseño PD** | **Restricciones (costo, tiempo, peso)** |
|---|---|---|
| Listado de lo que el diseño debe hacer | Lista de cómo debe ser (dibujos) | Lista de cómo debe ajustarse |
| Comience con verbos | Comience con sustantivos | |
| Satisfacer las necesidades del usuario | Satisfacer los RF | Definir los límites |
| Independencia con otros RF | Seleccionar un PD por cada RF | Pueden ser vinculados para varios RF |
| Tener tolerancias funcionales | Tener tolerancias físicas | Tener límites |

El axioma de información indica que el diseño con la probabilidad más alta de éxito es el mejor diseño. El contenido de información representa la complejidad del diseño y se puede definir como el complemento de la probabilidad “P” de un parámetro de diseño dado en la satisfacción de un PD con su respectivo RF. Cuando los RF son independientes el contenido de información total para el diseño, es la suma de todos los Requerimientos Funcionales (Suh, 1990). El contenido de información de un RF dado puede ser calculado usando la ecuación 2.4:

$$I_i = log\left(\frac{1}{Pi}\right) = -\,log_2\,Pi$$ Ecuación 2.4

La información está dada en unidades de *bits* (*bit* es la unidad mínima de información empleada en informática). La función logaritmo es seleccionada, ya que el contenido de la información será aditivo cuando existan varios RF que deban ser satisfechos simultáneamente (Suh, 1990). En el caso general para RF, el contenido de la información para el sistema entero $I_{SYS}$ está representado en la ecuación 2.5:

$$I_{sys} = -\,log_2\,Pm$$ Ecuación 2.5

Cuando *Pm* es la probabilidad global de lograr cada uno de los RF.

Cuando todos los RF son estadísticamente independientes:

$$P_m = \prod_{i=1}^{m} Pi$$ Ecuación 2.6

La información del sistema $I_{sysm}$ puede ser expresado de acuerdo con la ecuación 2.7:

$$\boldsymbol{I_{sysm}} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{m}} \boldsymbol{Ii} = -\sum_{i=1}^{m} log_2 Pi$$ Ecuación 2.7

El axioma del contenido de información está relacionado con las tolerancias y capacidades de cumplir los PD. La probabilidad de éxito es la probabilidad de conocer las especificaciones del diseño, las áreas de intersección entre el rango del diseño (voz del cliente) y el rango del sistema (voz del proceso). El rango del sistema es denotado como RS (por sus siglas en inglés, *System Range*) y el rango del diseño como RD (por sus siglas en inglés, *Desing Range*). La intersección entre el rango del diseño y el rango del sistema es llamado rango común y se denota como RC (por sus siglas en inglés, *Common Range*). La probabilidad de éxito está definida como el área del rango común al rango del sistema. De esta forma, el contenido de la información puede escribirse como se muestra en la ecuación 2.8.

$$i = log\,(\frac{RS}{RC})$$ Ecuación 2.8

El axioma de información establece que el diseño con la más pequeña ***i*** (mínima información) es el mejor diseño: este requiere el mínimo de información para lograr las metas del diseño. Cuando todas las probabilidades son igual a 1.0 el contenido de información es cero, e inversamente, la información requerida es infinita cuando uno o más probabilidades son igual a cero. Esto es, si la probabilidad es menor, se debe proveer más información para satisfacer los Requerimientos Funcionales (Suh, 2001).

## Los dominios

El proceso de diseño involucra cuatro dominios. Este proceso implica una relación recíproca entre lo que se quiere lograr (el qué) y cómo satisfacer esa necesidad (el cómo). Para la sistematización de este proceso se crearon cuatro dominios que representan las cuatro diferentes actividades de diseño que proveen los fundamentos del DA. El dominio a la izquierda representa “lo que se quiere lograr”, mientras que el dominio a la derecha representa la solución del diseño, “cómo se pretende satisfacer los requerimientos especificados en el dominio de la izquierda”. En la figura 2.6 se ilustra este proceso.

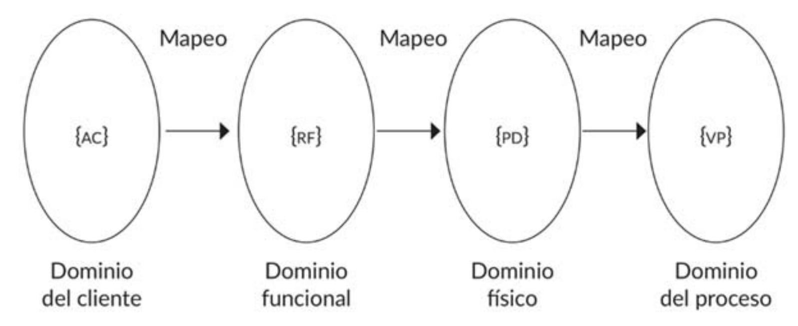



Figura 2.6. Los cuatro dominios del mundo del diseño.

El dominio del cliente se caracteriza por las necesidades (o atributos) que el cliente busca en los productos, procesos, sistemas o materiales. En el dominio funcional, las necesidades del cliente son especificadas en términos de RF y RS. Para satisfacer los RF especificados, se conciben los Parámetros de Diseño (PD) en el dominio físico. Finalmente, para hacer el producto especificado en términos de PD, se desarrolla un proceso caracterizado por las variables del proceso (VP) en el dominio del proceso.

Como ejemplos de estos dominios, se presentan los siguientes: Un cliente en la industria de semiconductores necesita cubrir la superficie de la oblea de silicón con fotorresistencia. Esta evaluación de la necesidad del cliente es hecha en el dominio del cliente. Basados en esta necesidad, los ingenieros de una compañía de equipos establecen los RF en términos de espesor y uniformidad, además de las restricciones en términos del nivel tolerable de partículas contaminantes, tasa de producción y costo.

Las $\{X\}$ son los vectores característicos de cada dominio. Durante el proceso de diseño se avanza desde el dominio de la izquierda hasta el dominio de la derecha. El proceso es iterativo en el sentido que el diseñador puede regresar al dominio de la izquierda basado en las ideas generadas en el dominio de la derecha.

Por supuesto, los ingenieros deben solicitar información de sus clientes durante el proceso. Esta formulación de los RF es hecha en el dominio funcional. Luego, el diseñador del equipo, basado en datos experimentales y experiencia pasada, debe concebir una solución de diseño e identificar los PD importantes en el dominio físico. El diseñador puede escoger cubrir la superficie con fotorresistencia pulverizándola en el disco (por ejemplo, un PD puede ser un rociador) y luego controlar el espesor haciendo girar el disco a alta velocidad para hacer uso de la fuerza centrífuga. Luego, el ingeniero de manufactura en el dominio de proceso debe concebir los medios de fabricación del equipo, especificando VP, tales como los medios para controlar la entrega de la fotorresistencia, la velocidad rotacional, temperatura, etcétera, que pueden proporcionar los PD.

En ingeniería mecánica, usualmente se piensa en diseño en términos de diseño de producto, y frecuentemente diseño de *hardware*. Sin embargo, los ingenieros también tratan con otros diseños igualmente importantes, tales como *software*, procesos de manufactura, sistemas y organizaciones. Todos los diseñadores pasan por un proceso de pensamiento similar, independientemente de los objetivos específicos de su esfuerzo, a pesar de que algunos creen que su diseño es único y diferente de los diseños de los demás.

En ciencia de los materiales, la meta del diseño es desarrollar materiales con ciertas propiedades (es decir, RF). Esto se hace mediante el diseño de microestructuras (es decir, PD) para satisfacer los RF

y mediante el desarrollo de métodos de procesamiento de materiales (es decir, VP) crear las microestructuras deseadas. En negocios, después de que las metas del negocio {RF} han sido establecidas, la siguiente tarea es diseñar la estructura, estrategia y organización {PD} del negocio para cumplir las metas, y luego buscar recursos humanos y financieros {VP} para operar el negocio. De manera similar, las universidades deben definir las misiones de sus instituciones (es decir, los RF), diseñar sus organizaciones de manera efectiva para ser una empresa de educación e investigación eficiente (es decir, los PD) y tratar con problemas de recursos humanos y financieros (es decir, VP). En el caso del gobierno de los Estados Unidos, el presidente debe definir el conjunto correcto de RF, diseñar la organización gubernamental y programas (PD) para lograr estos RF y asegurar los recursos necesarios para hacer el trabajo (VP), sujeto a las restricciones impuestas por la Constitución y el congreso. En todo diseño organizacional, el dominio del proceso representa los recursos humanos y financieros.

La tabla 2.3, muestra cómo todas estas tareas de diseño, aparentemente diferentes y de diversos campos diferentes, pueden ser descritas en términos de los cuatro dominios del diseño. En el caso del diseño de producto, el dominio del cliente consiste de las necesidades o atributos que el cliente está buscando en un producto. El dominio funcional consiste de los RF, frecuentemente definidos como especificaciones de ingeniería y restricciones. El dominio físico es el dominio en el cual los PD claves son elegidos para satisfacer los RF. Finalmente, el dominio del proceso específico consiste en las VP de manufactura que pueden producir los PD.

Tabla 2.3. Características de los cuatro dominios del mundo del diseño para varios diseños: manufactura, materiales, *software*, organizaciones, sistemas, y negocios.

| | **Dominio del cliente {AC}** | **Dominio funcional {RF}** | **Dominio físico {PD}** | **Dominio del proceso {VP}** |
|---|---|---|---|---|
| Manufactura | Atributos que los clientes desean | Requerimientos Funcionales especificados para el producto | Variables físicas que pueden satisfacer los Requerimientos Funcionales | Variables de proceso que pueden controlar los parámetros del diseño |
| Materiales | Desempeño deseado | Propiedades requeridas | Microestructura | Procesos |
| *Software* | Atributos deseados en el *software* | Características de salida de los códigos del programa | Variables de entrada<br>Algoritmos<br>Módulos<br>Códigos de programas | Subrutinas<br>Códigos de máquinas<br>Compiladores<br>Módulos |
| Organizaciones | Satisfacción del cliente | Funciones de la organización | Programas<br>Oficinas<br>Actividades | Personal y otros recursos para dar soporte a los programas |
| Sistemas | Atributos deseados del sistema | Requerimientos Funcionales del sistema | Máquinas<br>Componentes<br>Subcomponentes | Recursos (humanos, financieros, etc.) |
| Negocios | ROI (Retorno de la inversión) | Metas del negocio | Estructura del negocio | Recursos humanos y financieros |

Todos los diseños encajan en estos cuatro dominios. Por lo tanto, todas las actividades de diseño, sean diseño del producto o diseño de *software*, pueden ser generalizadas en términos de los mismos principios. Debido a esta estructura lógica del mundo del diseño, los principios generales del diseño pueden ser aplicados a todas las aplicaciones del diseño y se puede considerar que todos los problemas del diseño surgen en estos cuatro dominios de manera sistemática, y si es necesario, de manera concurrente.

## El mapeo

Mapeo de las necesidades del cliente a los Requerimientos Funcionales. Las necesidades o atributos del cliente (AC) deseados en un producto son algunas veces difícil de definir o son vagamente definidos. Sin embargo, se tiene que hacer lo mejor posible para entender las necesidades de los clientes trabajando con ellos para definirlas. La regla es hacer las preguntas correctas a los clientes correctos en el tiempo correcto.

De acuerdo con Suh (2001), existen algunos medios formales de ordenar, de acuerdo con su importancia, las necesidades del cliente. Una metodología formal llamada despliegue de la función de calidad (QFD, *Quality Function Deployment*, por sus siglas en inglés) para determinar AC fue desarrollada por Fuji Xerox e introducida en los Estados Unidos por Clausing (1994). Toyota introdujo la idea de la “casa de la calidad” para identificar y priorizar las necesidades del cliente, relacionarlas con características de ingeniería, compararlas contra los productos de los competidores, establecer características importantes de ingeniería, y seleccionar las áreas importantes de mejoramiento. Hay otras técnicas, tales como la matriz de Pugh, el proceso de análisis Jerárquico (AHP, *Analytic Hierarchy Process,* por sus siglas en inglés), la función de pérdida de Taguchi y la suma ponderada de atributos del producto. Estas metodologías son muy útiles para mejorar un producto existente, pero no muy efectivas en desarrollar productos innovadores. En el último caso, es mejor recordar que los RF deben ser definidos en un ambiente de solución neutral, esto implica que estos deben definirse tratando de no pensar en un diseño previamente definido o una solución de diseño ya existente.

A pesar de la importancia de las entradas del cliente en determinar los RF, no siempre pueden ser conocidos preguntando a los clientes por sus preferencias. El teorema de la imposibilidad de Arrow menciona que, en general, la preferencia indicada por individuos en un grupo no tiene valor alguno al determinar la preferencia del grupo como un entero. Esto se muestra en el ejemplo 2.2.

## Ejemplo 2.2. Teorema de imposibilidad de Arrow

Considere el caso de tener tres alternativas, A, B, C. se les pide a tres personas que indiquen su preferencia entre estas tres alternativas. Basados en las respuestas de estas tres personas, ¿se puede tomar una decisión para lo que el grupo como un entero prefiere?

La respuesta es no. En la tabla 2.4 se enlistan las preferencias indicadas por tres distintos individuos (Hazelrigg, 1998).

Tabla 2.4. Preferencia de alternativas.

| | | **Alternativas** | | |
|---|---|---|---|---|
| Individuos | Preferencias | A *vs* B | B *vs* C | A *vs* C |
| Smith | A>B>C, A>C | A | B | A |
| Kim | B>C>A, B>A | B | B | C |
| Stein | C>A>B, C>B | A | C | C |
| Preferencia del grupo | | A>B | B>C | C>A |

Los resultados muestran que el grupo está confundido sobre lo que quiere. Prefiere A sobre B, B sobre C, pero prefiere C sobre A en lugar de A sobre C, como uno podría haber esperado basado en las dos primeras elecciones.

Una vez que se han identificado y definido las necesidades del cliente (o los atributos que el cliente busca en un producto), estas necesidades deben ser traducidas a los RF. Esto debe ser hecho dentro de un ambiente de solución neutral. Si los RF son definidos basados en un diseño existente como se explicó anteriormente, entonces simplemente se estará especificando tal producto, obstaculizando el pensamiento creativo al introducir una tendencia personal.

En la traducción de las necesidades del cliente a los RF, el rango de uso del diseño debe ser considerado, a pesar de que el cliente casi nunca especificará tal rango. Esto es, los RF deben ser establecidos con la variación ambiental anticipada, variación del uso del cliente, la vida útil especificada antes de los requisitos del diseño. Si tales variables de “ruido” son representadas como requerimientos del diseño, entonces el alojamiento para manejarlos será una propiedad integral del diseño. Por lo tanto, el diseño será inherentemente sólido ante tales fuentes de variación, y el proceso de simplificación será simplificado significativamente.

Las compañías industriales frecuentemente usan “especificaciones de requerimientos de mercado” (ERM) como el documento de la especificación del producto. Los documentos ERM son frecuentemente muy gruesos, por lo que las primeras entradas son proporcionadas por la gente del mercado. Usualmente el documento es una mezcla aleatoria de AC.

## Los axiomas

En esta teoría se postulan axiomas fundamentales que presiden el proceso de diseño. Para ello, dos axiomas fueron identificados al examinar los elementos presentes comúnmente en los buenos diseños. Estos son el axioma de independencia (AI) y el axioma de información (Ainf). El primero de los axiomas de diseño es el axioma de independencia y establece que la independencia de los Requerimientos Funcionales (RF) establecidos debe mantenerse siempre. Se establece formalmente así:

### Axioma 1: Axioma de independencia

Mantener la independencia de los Requerimientos Funcionales (RF). Durante el proceso de mapeo es importante realizar decisiones acertadas al usar el axioma de independencia (AI). Este axioma debe siempre satisfacerse al elegir los Parámetros de Diseño (PD) correctos. Como pueden existir varios diseños que satisfagan este axioma, el axioma de información puede usarse para seleccionar el mejor diseño, siempre y cuando el AI haya sido alcanzado.

### Axioma 2: Axioma de información

Minimizar el contenido de información del diseño. El segundo de los axiomas, el axioma de información (Ainf), establece que aquel diseño con el menor contenido de información (I) es el mejor, de tal forma que, en un diseño ideal, tal contenido debería siempre ser cero para satisfacer el requerimiento funcional (*Functional Requirment*, FR) en cuestión. Con respecto al valor de (I), se define como la probabilidad de satisfacer los Requerimientos Funcionales (RF). El menor valor de (I) garantiza una menor incertidumbre en satisfacer los RF; por lo tanto, es el diseño con la mayor probabilidad de éxito en cumplir con los Requerimientos Funcionales (RF) establecidos.

Para Suh (2001), cuando los axiomas propuestos por esta teoría han sido satisfechos o cumplidos, el desempeño, robustez, confiabilidad y funcionalidad de productos, procesos, *software*, sistemas y organizaciones han podido ser mejorados. Múltiples ejemplos de esto existen en la literatura y en la obra de Suh. De la misma forma, máquinas y procesos cuyo desempeño es deficiente pueden ser analizados con DA para determinar las causas de su mal funcionamiento y resolver estos problemas mediante estos axiomas del diseño.

Cuando las necesidades en el dominio del cliente han sido percibidas e identificadas, los atributos buscados en un producto o sistema deben establecerse; entonces deben ser traducidos como Requerimientos Funcionales. Existe un mapeo a partir de los requerimientos del cliente (RC) que se encuentran en el dominio del cliente, hacia los Requerimientos Funcionales en el dominio funcional, y de estos hacia los Parámetros de Diseño en el dominio físico y de estos hacia las variables de proceso en el dominio de proceso. Durante este procedimiento es recomendable no pensar en un diseño preconcebido, sino exaltar la innovación. De esta forma, el mapeo y el zig-zag es la manera mediante la cual se construye un diseño original. La figura 2.7 describe este proceso entre el dominio funcional y el dominio físico. El mapeo se realiza entre los dominios. Cuando se realiza entre el dominio funcional y el dominio físico; posiblemente existan múltiples Parámetros de Diseño, por lo que es importante

elegir aquel que satisfaga el requerimiento funcional sin afectar otros requerimientos. De esta manera se conservará el axioma de independencia (AI). Además, se busca que este pueda cumplirse dentro de su propio rango de diseño (RD) como lo indica el axioma de información.

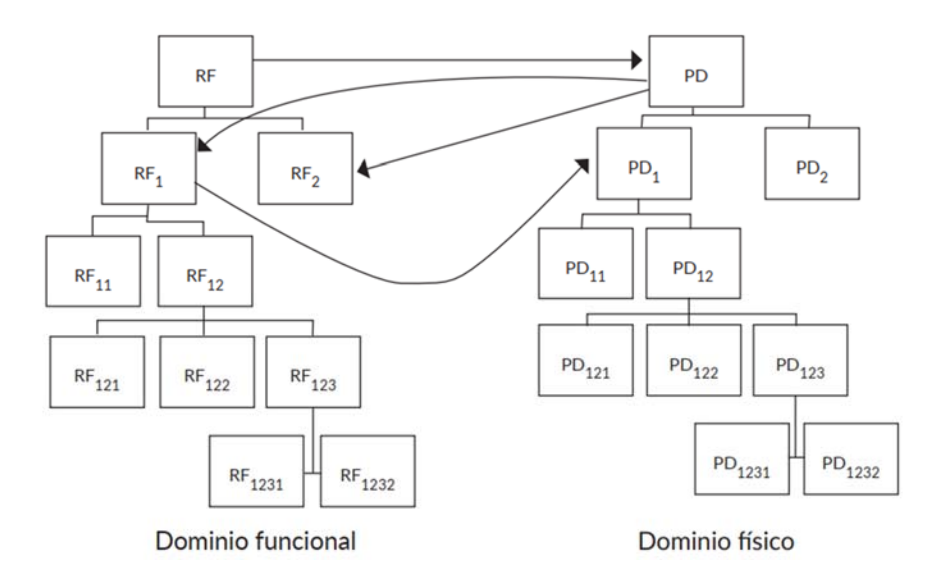



Figura 2.7. El mapeo.

## REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Y PARÁMETROS DE DISEÑO

Los Requerimientos Funcionales representan el mínimo conjunto de requerimientos independientes que caracterizan por completo las necesidades funcionales de un producto, llámese software, organización, sistema etcétera, dentro del dominio funcional. Por definición, cada RF debe ser independiente de cualquier otro RF al momento en que los requerimientos son establecidos. Por otro lado, los Parámetros de Diseño (PD) son variables físicas claves, dentro del dominio físico que caracterizan el diseño que satisface los RF específicos establecidos.

El proceso de mapeo entre los dominios puede expresarse matemáticamente en términos de vectores que definen los objetivos del diseño y sus soluciones. Se establecen vectores para los Requerimientos Funcionales y sus correspondientes Parámetros de Diseño y la relación entre ellos se muestra la ecuación 2.9:

$$\{RF\} = [A]\{PD\}$$ Ecuación 2.9

Donde [A] es la matriz de diseño que relaciona los RF con los PD y caracteriza el diseño del producto, representada como ejemplo en la ecuación 2.10 para tres RF y tres PD. Escrita en forma diferencial en la ecuación.

$$[A] = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}$$ Ecuación 2.10

En su forma general es:

$$RF_i = \sum_{i=1}^{n} A_{ij} PD_j$$ Ecuación 2.11

Donde n = número de PD.

$$\{dRF\} = [A]\{dPD\}$$ Ecuación 2.12

Para satisfacer el AI, la matriz de diseño [A] debe ser diagonal o triangular. En una matriz diagonal, cada RF puede ser satisfecho independientemente de su respectivo PD, arrojando un diseño no acoplado. Cuando la matriz de diseño es triangular, la independencia de los RF puede garantizarse si, y solo si, los PD son determinados en una secuencia apropiada, obteniendo un diseño desacoplado. Cualquier otra forma que adquiera la matriz arrojará diseños acoplados.

El diseño con la I más pequeña es el mejor, ya que requiere la mínima cantidad de información para alcanzar sus objetivos y metas. Cuando todas las probabilidades son igual a 1.0, el contenido de información es cero; en el caso contrario, la información requerida por el sistema es infinita, o sea, si la probabilidad es pequeña, se debe proveer de mayor información para satisfacer los RF, tratándose así de un diseño complejo. De tal forma, la noción de complejidad de los sistemas está unida al rango de diseño (RD) en donde los RF deben ser satisfechos. Entre más reducido sea el rango de diseño, más difícil será satisfacer los RF.

A partir del proceso de mapeo surgen las matrices de diseño que definen la relación entre los RF con los PD. Para satisfacer el axioma de independencia, las matrices deben ser triangulares o diagonales. Una matriz diagonal da origen a un diseño no acoplado donde cada RF puede satisfacerse con su respectivo PD y se cumple el axioma de independencia. En una matriz triangular, la independencia de los RF se garantiza siempre cuando los PD puedan ser dispuestos en la secuencia adecuada. Cualquier otra forma o disposición de la matriz da origen a un diseño acoplado que incumple el axioma de independencia.

## TEOREMAS Y COROLARIOS

El empleo de axiomas en el diseño parece ser prometedor porque la historia nos dice que el conocimiento basado en los axiomas continuará desarrollándose con teoremas y corolarios mientras se mantengan los axiomas. Un subconjunto de corolarios y las teorías del Diseño Axiomático, desarrollado por Suh, son mencionados a continuación. Los teoremas adicionales también son desarrollados por Suh (2001).

- Corolario 1: (Desacoplando diseños acoplados). Desacoplar o separar partes o aspectos de una solución si el RF está acoplado, o hacer interdependiente en el diseño propuesto.
- Corolario 2: (Minimizar los RF). Minimizar el número de RF y restricciones (Rs).
- Corolario 3: (Integración de las partes físicas). Integrar las características del diseño en una simple parte física si el RF puede ser independientemente satisfecho en la solución propuesta.
- Corolario 4: (Uso de estandarización). Utilizar partes estandarizadas e intercambiables si el uso de estas partes es consistente con los RF y las restricciones (Rs).
- Corolario 5: (Uso de simetría). Utilizar formas o componentes simétricos si son consistentes con los RF y las Rs.
- Corolario 6: (Utilizar rangos del diseño grandes). Especificar los rangos permisibles más grandes del diseño en la declaración de RF.
- Corolario 7: (Diseños no acoplados con menos información). Buscar un diseño no acoplado que requiera menos información en la satisfacción del diseño de RF.
- Corolario 8: (Reangularidad efectiva de un escalar). La reangularidad efectiva *R* para una matriz escalar acoplada o de elementos es la unidad.
- Teorema 1: (Acoplado por insuficientes números de PD). Cuando el número de PD es menor que el número de RF, el diseño es acoplado, ya que los RF no podrán ser satisfechos.
- Teorema 2: (Desacoplado un diseño acoplado). Cuando el diseño es acoplado porque el número de RF es mayor que el número de PD, este puede ser desacoplado agregando nuevos

PD hasta hacer igual el número de RF y PD; si el subconjunto de la matriz de diseño contiene elementos p x p iguales, constituye una matriz triangular.

- Teorema 3: (Diseños redundantes). Cuando hay más PD que RF, el diseño es redundante o acoplado.
- Teorema 4: (Diseños ideales). En un diseño ideal, el número de PD es igual al número de RF y los RF se mantienen siempre independientes entre cada uno de ellos.
- Teorema 5: (Necesidad de un nuevo diseño). Cuando un conjunto de RF es modificado por la adición de un nuevo RF, por sustitución de un RF con un nuevo RF, la solución dada por los PD originales no puede satisfacer el nuevo conjunto de RF. Consecuentemente, una nueva solución debe ser diseña.
- Teorema 6: (Trayectoria independiente de un diseño no acoplado). La información contenida en un diseño no acoplado es independiente de la secuencia de la cual los PD son cambiados para satisfacer el conjunto de RF dados.
- Teorema 7: (Trayectoria dependiente de un diseño no acoplado y un diseño acoplado). La información contenida en un diseño no acoplado y un diseño acoplado es dependiente de la secuencia de la cual los PD son cambiados para satisfacer el conjunto de RF dados.
- Teorema 8: (Independencia y tolerancia). Un diseño es no acoplado cuando el diseñador especifica tolerancias más grandes. En este caso, los elementos no diagonales de la matriz de diseño pueden ser omitidos para consideraciones del diseño.
- Teorema 9: (Manufactura de un diseño). Para que un producto pueda ser manufacturado con confiabilidad y robustez, la matriz del diseño del producto [A] (la cual relaciona el vector RF para el producto con el vector PD del producto) veces la matriz del diseño el proceso de manufactura [B], debe rendir una matriz triangular o diagonal. Consecuentemente, [A] o [B] representan un diseño acoplado; la independencia de los RF y la robustez del diseño no pueden ser logradas. Cuando la matriz del diseño es completamente triangular, estas deben de ser ambas triangular superior o ambas triangular inferior, para que el proceso de manufactura satisfaga la independencia de los Requerimientos Funcionales.
- Teorema 10: (Modularidad de mediciones independientes). Suponga que la matriz de diseño [MD] puede ser particionada en submatrices cuadradas no-ceros, solamente a lo largo de la diagonal principal. Entonces, la reangularidad *R*, y la semiangularidad *S* para [MD] son iguales al producto en sus mediciones correspondientes para cada submatriz no-cero.
- Teorema 11: (Invariancia). La reangularidad *R* y la semiangularidad *S* para una matriz de diseño [MD] son invariantes bajo el orden alternativo de las variables RF y PD, mientras el orden preserve la asociación de cada RF con su respectivo PD.
- Teorema 12: (Suma del contenido de la información). La suma de contenido de la información para un conjunto de eventos es también información; provee las probabilidades condicionales que son usadas cuando los eventos no son estadísticamente independientes.
- Teorema 13: (Contenido total de información del sistema). Si cada PD es probabilísticamente independiente de otros PD, el contenido total de la información del sistema es la suma de información de todos los eventos individuales asociados con el conjunto de RF que deben ser satisfechos.
- Teorema 14: (Contenido de información de diseños acoplados contra diseños no acoplados). Cuando el estado de los RF es cambiado de un estado a otro en el dominio funcional, la cantidad de información requerida para el cambio es más grande para un proceso acoplado que para un proceso no acoplado.
- Teorema 15: (Diseño de interfaces de manufactura). Cuando el sistema de manufactura compromete la independencia de los RF del producto, el diseño del producto debe ser modificado o un nuevo proceso de manufactura debe ser diseñado o usado para mantener la independencia de los RF del producto.

- Teorema 16: (Igualdad del contenido de la información). Todo el contenido de la información que es relevante para las tareas del diseño es igualmente importante, sin importar su origen físico, y ningún factor de peso debe ser aplicado a este contenido.
- Teorema 17: (Importancia de las decisiones de alto nivel). La calidad del diseño depende de la selección de RF y el mapeo de un dominio a otro dominio. Las decisiones incorrectas tomadas en los niveles más altos de la jerarquía del diseño no se pueden rectificar en las decisiones de diseño en un nivel inferior.
- Teorema 18: (Mejor diseño para sistemas grandes). El mejor diseño entre los diseños propuestos para un sistema que satisface sus RF y el axioma de independencia puede ser seleccionado si el conjunto completo de subconjuntos del vector {RF} que el sistema debe satisfacer durante su vida es conocido *a priori*.
- Teorema 19: (Necesidad de un mejor diseño para sistemas grandes). Cuando el conjunto completo de subconjuntos de RF que un sistema flexible grande dado debe satisfacer durante su vida no es conocido *a priori*, no hay garantía de que un diseño específico siempre contenga el mínimo de información para todos los posibles subconjuntos, y por lo tanto, no hay garantía de que el mismo diseño sea el mejor por siempre.
- Teorema 20: (Mejorando la probabilidad de éxito). La probabilidad de seleccionar el mejor diseño para un sistema flexible grande aumenta cuando los subconjuntos de RF del sistema que deben ser satisfechos ofrecen un acercamiento al sistema completo.
- Teorema 21: (Adaptabilidad infinita contra sistemas completos). Un sistema largo y flexible con una infinita adaptabilidad (o flexibilidad) puede no representar el mejor diseño cuando un sistema grande es utilizado en situaciones donde el conjunto completo de subconjuntos de RF que el sistema debe satisfacer es conocido *a priori*.
- Teorema 22: (Complejidad de sistemas grandes). Un sistema grande no es necesariamente complejo si este tiene una alta probabilidad de satisfacer los RF especificados por el sistema.
- Teorema 23: (Calidad del diseño). La calidad del diseño de un sistema grande es determinado por la calidad de sus bases de datos, la selección adecuada de los RF y el proceso de mapeo.

## RESUMEN

En este capítulo se revisó que los axiomas son muy importantes en varios campos de la ciencia y la tecnología. Se establecieron las representaciones matemáticas de las matrices de diseño, se retomaron los conceptos de diseño no acoplado, desacoplado y no acoplado y se plantearon ejemplos de ellos. En el diseño, los axiomas son un recurso poderoso, ya que nos permiten la redacción de teoremas y corolarios. Además, en este capítulo también se revisó la importancia de la aplicación del Diseño Axiomático y de nuevas tecnologías que proporcionan a los diseñadores más recursos.

## REFERENCIAS

BROWN, C. A. (2005). Teaching axiomatic design to engineers—Theory, applications, and software. *Journal of Manufacturing Systems, 24*, 186-195. doi: http://doi.org/10.1016/S0278-6125(06)80007-5.

CLAUSING, D. (1994). *Total quality development: a step-by-step guide to world class concurrent engineering*. Nueva York: ASME Press.

HAZELRIGG, G. A. (1998). Theoretical foundations of engineering design. *Lecture of MIT*.

PEDROZO, E. J. (2010). *Diseño de un modelo integral de mejora continua del mantenimiento a través del enfoque axiomático*. Ciudad Juárez.

PIMENTEL, A. R., y Stadzisz, P. C. (2006). Application of the independence axiom on the design of object-oriented software using the axiomatic design theory. *Journal of Integrated Design & Process Science, 10*(1), 57-69.

SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

SUH, N. P. (2001). *Axiomatic design: Advances and applications*. Oxford University Press.

# 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO AXIOMÁTICO

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con su etimología, la palabra método proviene del griego meta que significa “al lado” y hodos cuyo significado es “camino”; en conjunto forman la frase “al lado del camino”. En su sentido más amplio, método significa “el camino más adecuado para lograr un fin”. El método, considerado generalmente un proceso conceptual abstracto, carece de sentido si no se expresa por medio de un lenguaje y se aplica de manera práctica en la transformación de la realidad.

La metodología es el conocimiento del método o, según Pardinas (1989), “…el estudio crítico del método. Mientras que el método es la sucesión de pasos que se deben dar para descubrir nuevos conocimientos, la metodología es el conocimiento de estos pasos”.

Por otro lado, la técnica es el conjunto de instrumentos y medios a través de los cuales se efectúa el método. Si el método es el camino, la técnica propone las normas para ordenar etapas del proceso de diseño; proporciona instrumentos de descomposición, jerarquización, relación y análisis de independencia, y aporta todos los medios para aplicar el método. De esta forma, la técnica es la estructura del método.

El método de diseño está basado en estructuras lógicas que han dado prueba de aptitud a las que, de unirse con otras facultadas creativas, determinan los fines del diseño. Según coinciden distintos teóricos, se pueden distinguir con claridad cuatro constantes metodológicas del diseño:

- Información e investigación: Deben ser consistentes en el acopio y ordenamiento del material relativo al caso o problema particular.
- Análisis: Es la descomposición del sistema contextual en demandas, requerimientos o condiciones.
- Síntesis: Consiste en la propuesta de criterios válidos para la mayor parte de demandas y que el conjunto se manifieste en un todo estructurado y coherente llamado respuesta formal del problema.
- Evaluación: Consiste en respaldar la respuesta formal del sistema que contrasta con la realidad.

Como se mencionó anteriormente, el método es un medio para alcanzar un objetivo, por lo que se puede definir el método del Diseño Axiomático como un conjunto de reglas para obtener con mayor facilidad el diseño de un producto, sistema o proceso.

En este capítulo y con el fin de exponer más claramente la metodología del Diseño Axiomático se explicará paso a paso y con diversos ejemplos como esta metodología debe ser empleada para diseñar un producto.

## METODOLOGÍA DEL DISEÑO AXIOMÁTICO PROPUESTA POR NAM P. SUH

La metodología del diseño depende de las tareas específicas involucradas y del campo de aplicación. Sin embargo, Suh (1990), define los pasos necesarios dentro de la metodología del diseño enmarcados en el enfoque axiomático.

El primer paso dentro de la metodología del Diseño Axiomático es entender al cliente escuchando sus preocupaciones y necesidades, recopilando información relevante y datos históricos. Aunque el proceso de recopilación de la información necesaria para conocer las necesidades del cliente puede ser tan sencillo como solo preguntar, cabe aquí mencionar que existen técnicas especializadas que pueden ser utilizadas para cumplir efectivamente con este primer paso, entre las cuales se nombran las siguientes:

El QFD (Quality Function Deployment), mejor conocida como “la casa de la calidad”. El QFD se originó en el Japón en la década de 1960 y su metodología se consolidó y expandió geográficamente en las décadas siguientes. En el origen del QFD está la denominada matriz de la calidad, que es en esencia una tabla que relaciona la voz del cliente con los requerimientos que la satisfacen (Ficalora y Cohen, 2009). La matriz de la calidad suele desplegarse para dar lugar a otras matrices que permiten hacer operativa la voz del cliente. Las aplicaciones recientes del QFD trascienden a las industrias manufactureras y de los servicios y comprenden la formulación de la estrategia empresarial y el análisis organizacional en los sectores público y privado. Aunque la casa de la calidad es una herramienta que ha sido utilizada mayormente dentro del área de calidad, su efectividad para satisfacer las necesidades del cliente ha sido probada ampliamente. La figura 3.1 muestra un ejemplo de la matriz de la calidad con las diferentes secciones que la componen.

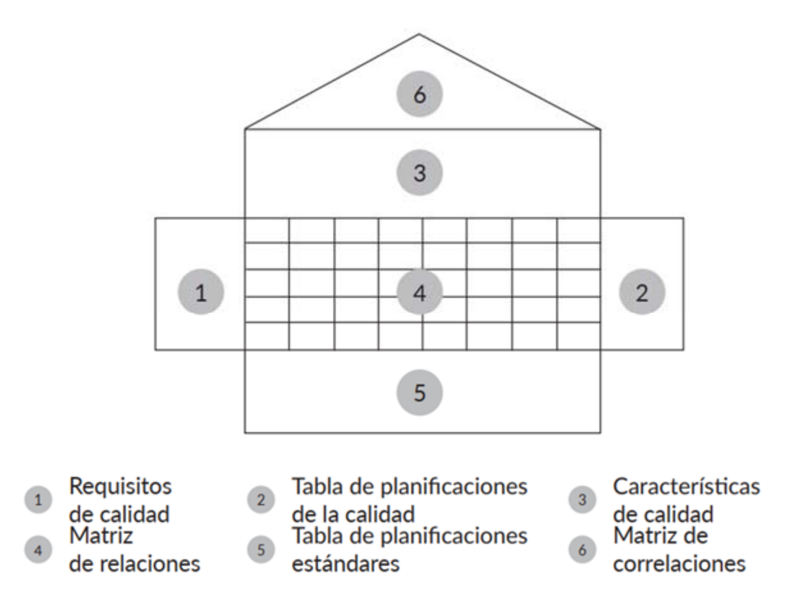



Figura 3.1. Ejemplo de la matriz de la calidad. Adaptado de Turmero Astros Ván José, sin fecha.

El Método Kano: Hacia fines de la década de 1970, Noriaki Kano, un académico japonés, refinó el concepto de calidad. Kano utilizó dos dimensiones para evaluar la calidad: (1) el grado de rendimiento de un producto, y (2) el grado de satisfacción del cliente que lo utiliza. Ampliaba así el concepto de calidad utilizado hasta entonces, que juzgaba la calidad de los productos sobre una sola escala, de “bueno” a “malo”. Trabajando sobre un plano cartesiano de funcionalidad-satisfacción, Kano definió tres tipos de calidad: obligatoria, unidimensional (o de rendimiento) y atractiva. Kano ideó un cuestionario que clasifica las características de un producto para facilitar su diseño y orientar la estrategia de *marketing*. Este cuestionario permite obtener de una forma sistemática las necesidades del cliente, paso primordial para la metodología de diseño. La figura 3.2 muestra la clasificación de las características de un producto establecidas por el método Kano.

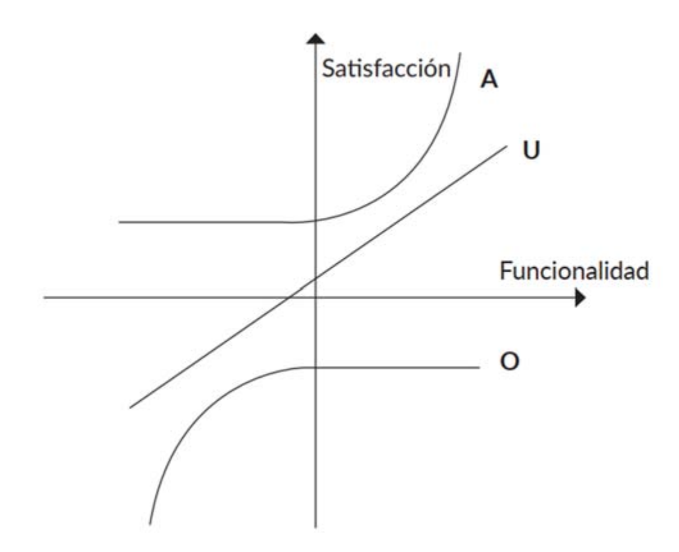



Figura 3.2. Clasificación de las características de un producto o servicio. Adaptado de DDS media, 2014.

## Ejemplo 3.1. Establecimiento de necesidades del cliente

Para ejemplo, se tiene que durante una revisión de datos históricos de calidad efectuada por una empresa industrial que manufactura producto automotriz se encontró que el 80 % de sus defectos se encontraba dentro de la categoría de “falta de componente” (Kogyo, 1988; Shingo, 1986).

El párrafo anterior deja entrever que existe una necesidad dentro de esta compañía, pero también se puede reconocer que esta necesidad no es lo suficientemente clara.

Para establecer de manera precisa las necesidades del cliente, además de los datos históricos recolectados, fueron planteadas las siguientes preguntas:

- ¿Los datos han sido estratificados de manera que se pueda identificar fácilmente cuál es el componente faltante con más incidencias?
- R: Sí, la categoría de “falta de componente”, se encuentra subdividida en tipo de componente faltante, el cual se encontró que es la cinta adhesiva de identificación.
- ¿La instalación del componente con mayor tasa de defectos se realiza de manera manual o automática?
- R: Se instala manualmente.
- ¿Existe algún dispositivo que prevenga o detecte la falta de este componente?
- R: No, en todo el proceso no se cuenta con un dispositivo que ayude a prevenir o detectar la falta de componente.

Con la información histórica recopilada y la obtenida con estas sencillas preguntas se pueden establecer las necesidades del cliente de la siguiente manera:

> Durante el proceso de ensamble manual de la cinta adhesiva de identificación, es necesario asegurar al 100% su presencia mediante la utilización de un dispositivo de prevención (Kogyo, 1988).

La figura 3.3 muestra la representación gráfica de cómo las necesidades del cliente son incorporadas al dominio del cliente.

Durante el proceso de ensamble manual de la cinta adhesiva de identificación, se necesita asegurar al 100 % su presencia mediante la utilización de un dispositivo de prevención.

[ACS]

Figura 3.3. Necesidades del cliente. Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso es la formulación de los Requerimientos Funcionales (RF) y las restricciones (Rs) fundamentadas en una evaluación de las necesidades del cliente. En este paso, es una excelente práctica consultar a todos los que de alguna manera están relacionados con el producto propuesto. Incluso, se debe considerar durante esta etapa el consultar áreas como mercadotecnia, ingeniería, servicio y grupos de confiabilidad cuando lo que se esté diseñando sea un producto terminado. Siempre que sea posible, los valores objetivos de los RF y las Rs deben ser establecidos.

Una vez que los RF estén determinados, otras áreas muy importantes en el desarrollo del producto, tales como mercadotecnia y ventas, deben ser revisados y estar de acuerdo en la selección de RF. Si estas áreas no están de acuerdo, no se debe proceder con el desarrollo del diseño hasta que se resuelvan todos los desacuerdos, ya que si no, el producto final sería diferente, dependiendo del grupo de RF y Rs a ser satisfechas.

El siguiente paso es mapear los Requerimientos Funcionales del dominio funcional al dominio físico, analizando todas las ideas de diseño e identificando los PD que satisfagan los RF previamente establecidos. En algunas ocasiones, para generar buenas ideas de los posibles PD es necesario considerar casos extremos, contradictorios, ejemplos de soluciones anteriores en el campo de diseño u otros campos diferentes y ejemplos parecidos. Es aquí donde comienza el proceso creativo del diseño. Es una buena práctica durante esta etapa generar preguntas como “qué si…”, “qué pasa si…”, etcétera.

## Ejemplo 3.2. Formulación de los Requerimientos Funcionales

Continuando con el ejemplo anterior, donde establecimos las necesidades del cliente, se procederá a formular los RF y las Rs de la siguiente manera:

Con el fin de facilitar el establecimiento de los RF, se definirá primero el $RF_0$ y su correspondiente $PD_0$, lo cual ayuda a visualizar el producto final. El primer requerimiento funcional puede ser establecido como se muestra en la figura 3.4.

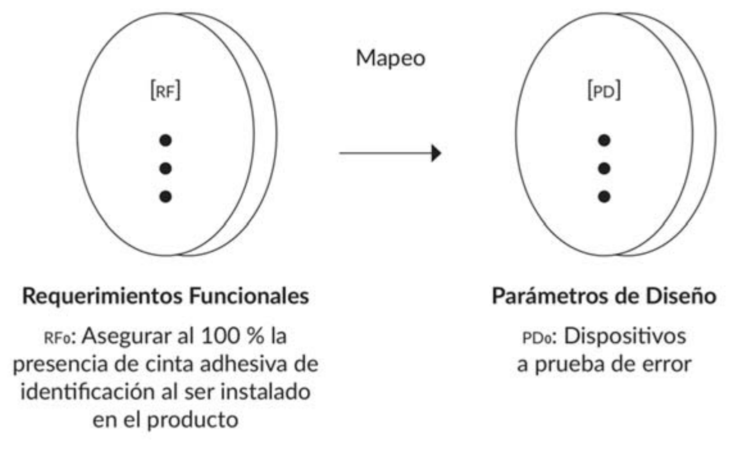



Figura 3.4. $RF_0$ y $PD_0$. Fuente: Elaboración propia.

$RF_0$: Asegurar al 100% la presencia de cinta adhesiva de identificación al ser instalada en el producto.

El parámetro de diseño (PD) que satisface $RF_0$ es el siguiente:

- $PD_0$: Dispositivo a prueba de error.
- $Rs_1$: El costo del dispositivo a prueba de error no debe exceder los 5000 pesos.

Este primer paso donde se define el $RF_0$ sirve para establecer de manera más sencilla los Requerimientos Funcionales de primer nivel, los cuales, para este ejemplo, se definieron de la siguiente manera:

**Descomposición de $RF_0$**

Zigzagueando entre los dominios físicos y funcionales se establecen tres Requerimientos Funcionales subordinados a $RF_0$: "Asegurar al 100% la presencia de cinta adhesiva de identificación al ser instalada en el producto". Los RF se muestran en la figura 3.5:

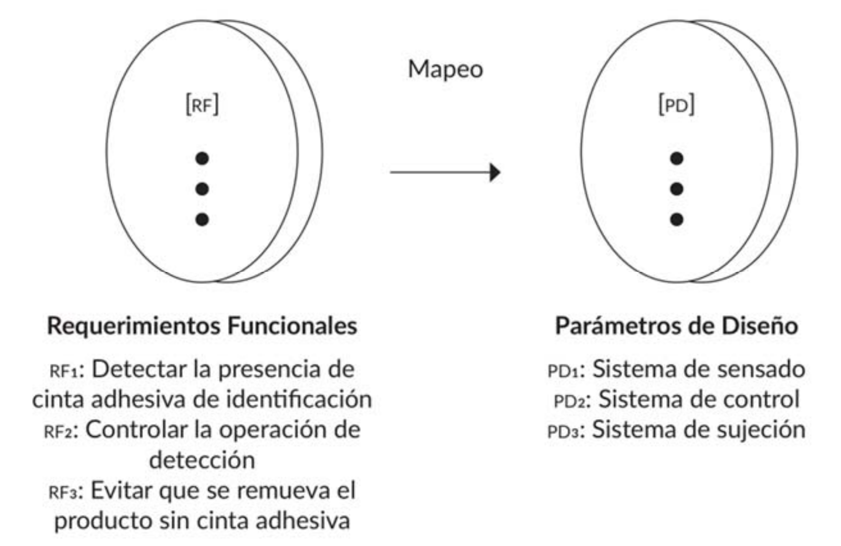



Figura 3.5. Mapeo del dominio funcional al dominio físico. Fuente: Elaboración propia.

- $RF_1$: Detectar la presencia de cinta adhesiva de identificación. Este requerimiento está asociado a la necesidad de que un dispositivo físico realice la función de detectar, en lugar de que esta operación sea realizada por una persona.
- $RF_2$: Controlar la operación de detección. El establecimiento de este requerimiento tiene la finalidad de que, una vez que un dispositivo físico ha detectado la presencia del componente, exista una condición de comparación que controle la operación de detección.
- $RF_3$: Evitar se remueva el producto sin cinta adhesiva de identificación. Este requerimiento busca que sea imposible remover el producto a menos que la operación haya sido realizada de la manera requerida.
- $PD_1$: Sistema de sensado.
- $PD_2$: Sistema de control.
- $PD_3$: Sistema de sujeción.

La figura 3.6 muestra la descomposición de $RF_0$. Dicha descomposición muestra el primer nivel jerárquico del diseño.

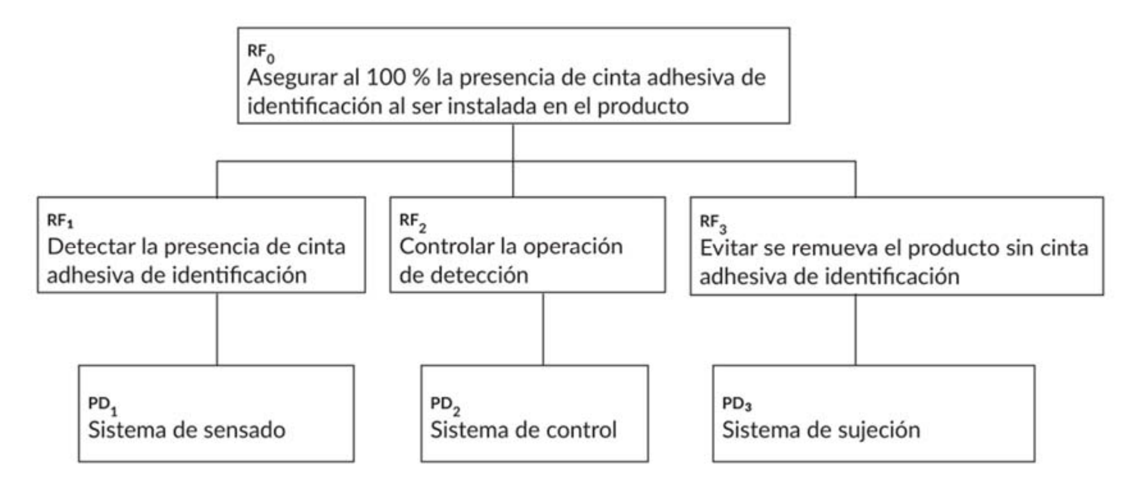



Figura 3.6. Descomposición de $RF_0$. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que los PD de primer nivel han sido seleccionados, el siguiente paso es escribir la ecuación de diseño que relaciona los posibles PD y los RF. Una manera más sencilla de visualizar la ecuación de diseño es a través de la utilización de la matriz de diseño. Este paso debe servir al diseñador para que compruebe que no estamos violando el primer axioma, es decir, el de independencia.

El diseño propuesto debe ser comparado con las restricciones Rs para verificar que no han sido violadas.

## Ejemplo 3.3. Establecimiento de la ecuación y matriz de diseño

Siguiendo con el ejemplo que se ha venido desarrollando en este capítulo, para diseñar un dispositivo a prueba de error basado en Shingo (1986), una vez establecidos los RF y los PD de primer nivel se establecen la ecuación y la matriz de diseño que caracteriza al planteamiento propuesto:

Ecuación de diseño:

$$\begin{Bmatrix} RF1 \\ RF2 \\ RF3 \end{Bmatrix} = [A] \cdot \begin{Bmatrix} PD1 \\ PD2 \\ PD3 \end{Bmatrix} \qquad \text{Ecuación 3.1}$$

La matriz de diseño:

$$\begin{Bmatrix} RF1 \\ RF2 \\ RF3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1 \\ PD2 \\ PD3 \end{Bmatrix} \qquad \text{Ecuación 3.2}$$

La matriz de diseño es desacoplada, ya que $RF_1$, $RF_2$ y $RF_3$ son independientes y solo afectados por sus correspondientes $PD_1$, $PD_2$ y $PD_3$.

Si es posible, deben hacerse bocetos y dibujos para capturar los PD seleccionados en una forma gráfica para cada nivel jerárquico de diseño, en adición a la matriz de diseño.

Para tener la documentación completa, es necesario escribir por qué ciertos PD son seleccionados y por qué otros no lo son.

## Ejemplo 3.4. Dibujos del diseño propuesto

Para el ejemplo desarrollado en este capítulo son tres los Parámetros de Diseño establecidos:

- $PD_1$: Sistema de sensado.
- $PD_2$: Sistema de control.
- $PD_3$: Sistema de sujeción.

Para facilitar el entendimiento de estos Parámetros de Diseño, hay que realizar bocetos que muestren la interacción de los mismos.

La figura 3.7 muestra de manera gráfica los tres PD y su interacción como parte integral del diseño; en la figura también se puede ver que como resultado del análisis de los posibles PD. El PD seleccionado para el sistema de sensado es un sensor de tipo mecánico. Se debe recordar que la única restricción establecida fue que el costo total del dispositivo no debería exceder los 5000 MXN, por lo que un sensor electrónico fue descartado por su alto costo.

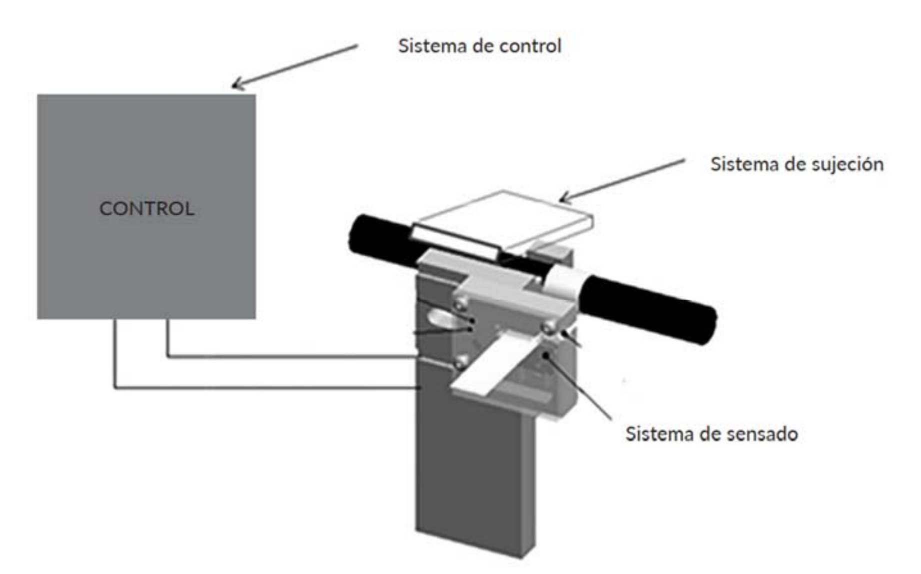



Figura 3.7. Boceto del diseño propuesto. Fuente: Elaboración propia.

Si los Parámetros de Diseño PD seleccionados no son la solución final y, por lo tanto, debe de existir una descomposición a nivel jerárquico inferior, el diseñador debe regresar al dominio funcional y descomponer los RF en requerimientos de inferior nivel, buscando siempre mantener la independencia entre los nuevos RF seleccionados a través de la correcta selección de los PD.

## Ejemplo 3.5. Descomposición de RF de primer nivel en niveles inferiores

Aunque los PD para el ejemplo desarrollado en este capítulo ya fueron seleccionados, su implementación todavía no es posible debido a que no se cuenta con el suficiente detalle de su diseño. Como ejemplo, seleccionar el $RF_1$, “detectar la presencia de la cinta adhesiva de identificación”, para descomponerlo al nivel en el cual la elección de los Parámetros de Diseño PD sea factible, y realizar los dibujos necesarios para su implementación. En este caso, el $RF_1$ puede ser descompuesto en cuatro Requerimientos Funcionales, los cuales son mostrados en la figura 3.8.

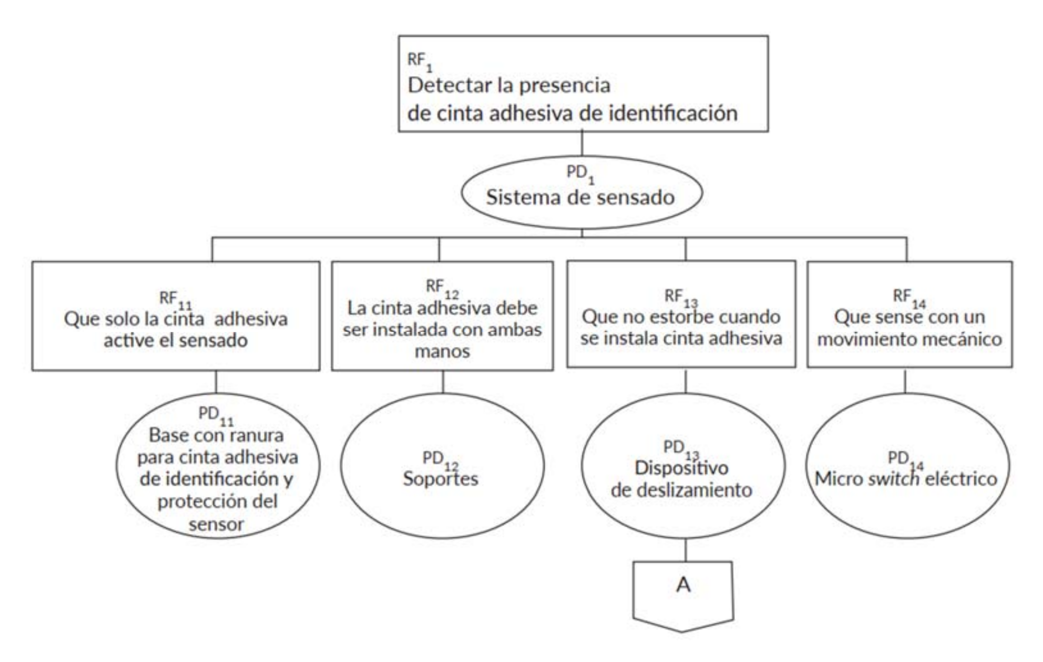



Figura 3.8. Descomposición del $RF_1$. Fuente: Elaboración propia.

Los RF y PD seleccionados durante la descomposición jerárquica de $RF_1$ son:

- $RF_{11}$: Que solo la cinta adhesiva de identificación active el sensado.
- $RF_{12}$: La cinta adhesiva de identificación debe ser instalada con ambas manos.
- $RF_{13}$: Que no estorbe cuando se instale la cinta adhesiva de identificación.
- $RF_{14}$: Que sense con un movimiento mecánico
- $PD_{11}$: Base con ranura para cinta adhesiva de identificación y protección del sensor.
- $PD_{12}$: Soportes.
- $PD_{13}$: Dispositivo de deslizamiento.
- $PD_{14}$: Micro *switch* eléctrico.

La figura 3.8, además, nos muestra que todavía es necesario descomponer el $RF_{13}$ en RF de nivel inferior, ya que no es posible implementar el $PD_{13}$ sin un poco más de detalle, por lo que la figura 3.9 muestra la descomposición del $RF_{13}$.

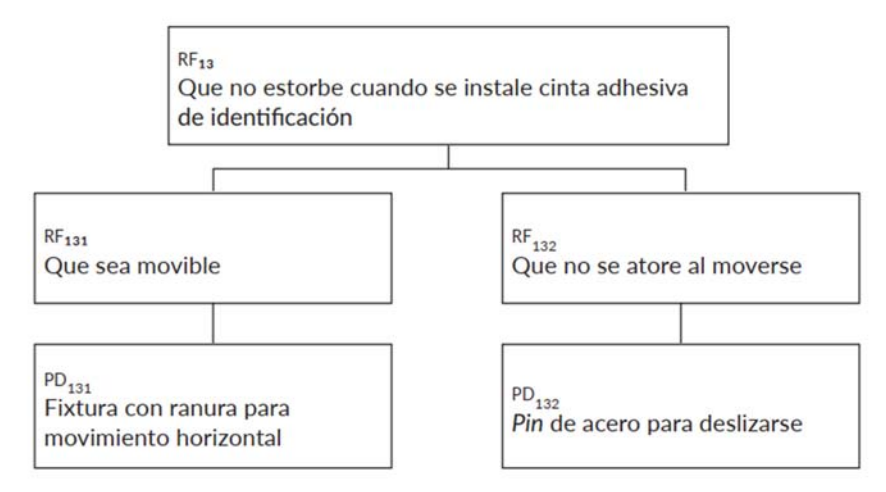



Figura 3.9. Descomposición del $RF_{13}$. Fuente: Elaboración propia.

Los RF y PD seleccionados durante la descomposición jerárquica de $RF_{13}$ son:

- $RF_{131}$: Que sea movible
- $RF_{132}$: Que no se atore al moverse
- $PD_{131}$: Fixtura con ranura para movimiento horizontal
- $PD_{132}$: Pin de acero para deslizarse

Los dibujos que permiten la implementación de los PD que satisfagan el requerimiento funcional $RF_1$, son mostrados en las figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14:

| Artículo No. | Número de parte | Descripción | Cantidad |
|---|---|---|---|
| 1 | Base | Delrin | 1 |
| 2 | Micro switch marca Steren #SS0501A | Microinterruptor con palanca de lámina de 5A, 125VCA. Su vida útil es de 200 000 operaciones eléctricas y 100 000 mecánicas | 1 |
| 3 | Mica | Lexan | 1 |
| 4 | Soporte3 | Delrin | 1 |
| 5 | HSScrew 10-24x 0.25-S | Tornillería | 1 |
| 6 | HSScrew 0.112-40x 0.375 HX-N | Tornillería | 3 |
| 7 | Dowel-Pin 3-32 x 0.375 | Acero | 2 |
| 8 | Soporte | Aluminio | 1 |
| 9 | Tubo | Producto | 1 |
| 10 | Tape 1 | Producto | 1 |
| 11 | HX-SHCS 0.138- 32x1.125x 1.125-N | Tornillería | 2 |

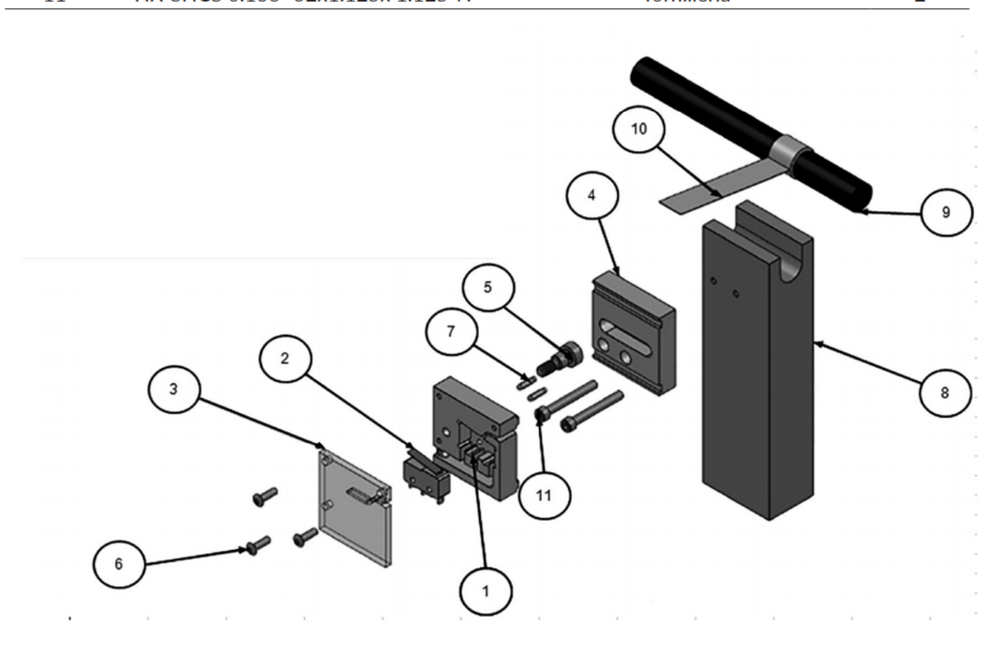



Figura 3.10. Dibujo esquemático del sistema de sensado. Fuente: Elaboración propia.

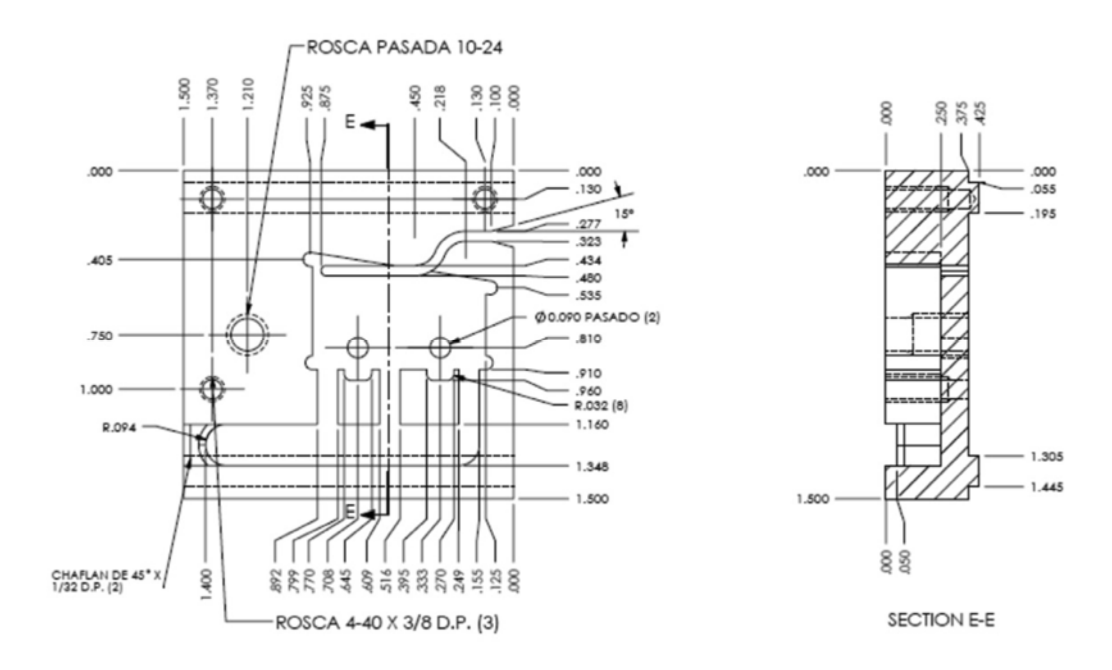



Figura 3.11. Dibujo de fixtura para sensor mecánico. Fuente: Elaboración propia.

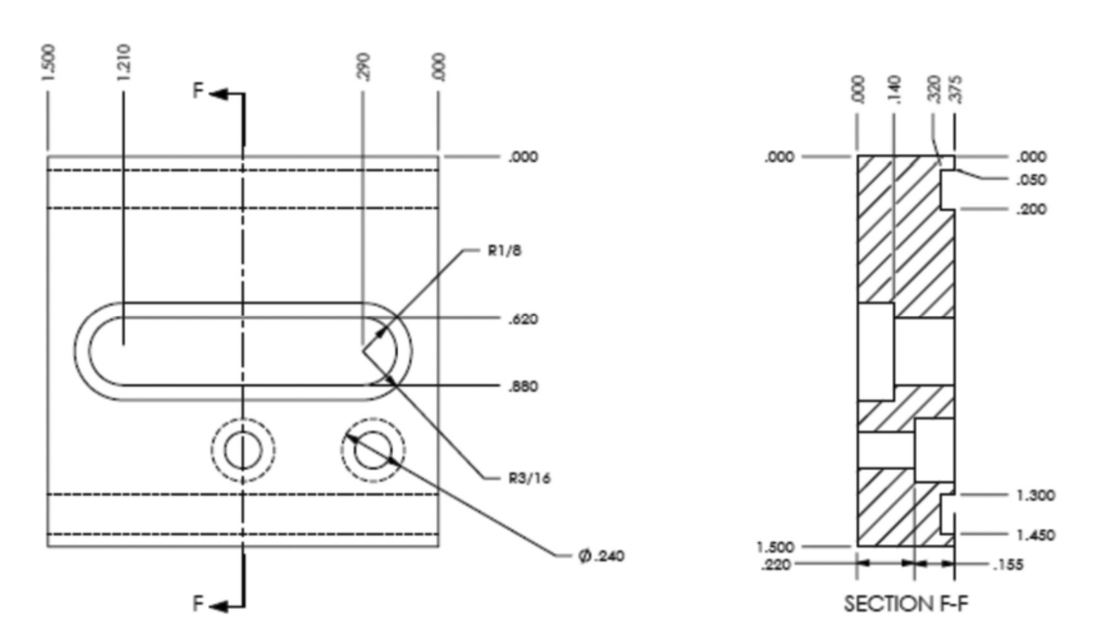



Figura 3.12. Dibujo de Fixtura para deslizamiento del sensor mecánico. Fuente: Elaboración propia.

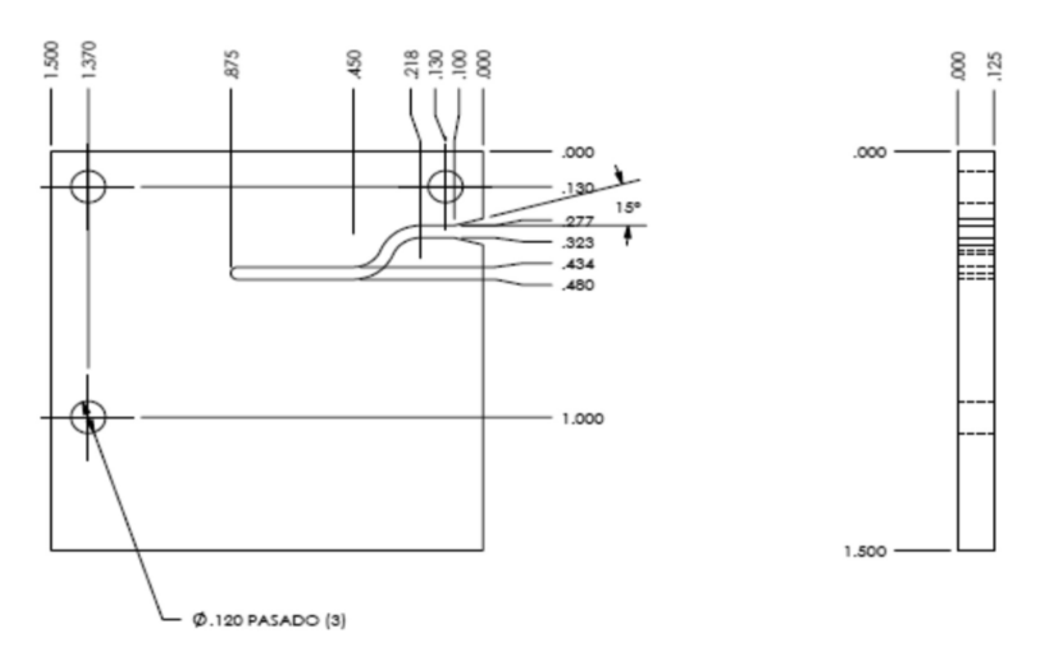



Figura 3.13. Dibujo de fixtura para ranura de la cinta adhesiva de identificación. Fuente: Elaboración propia.

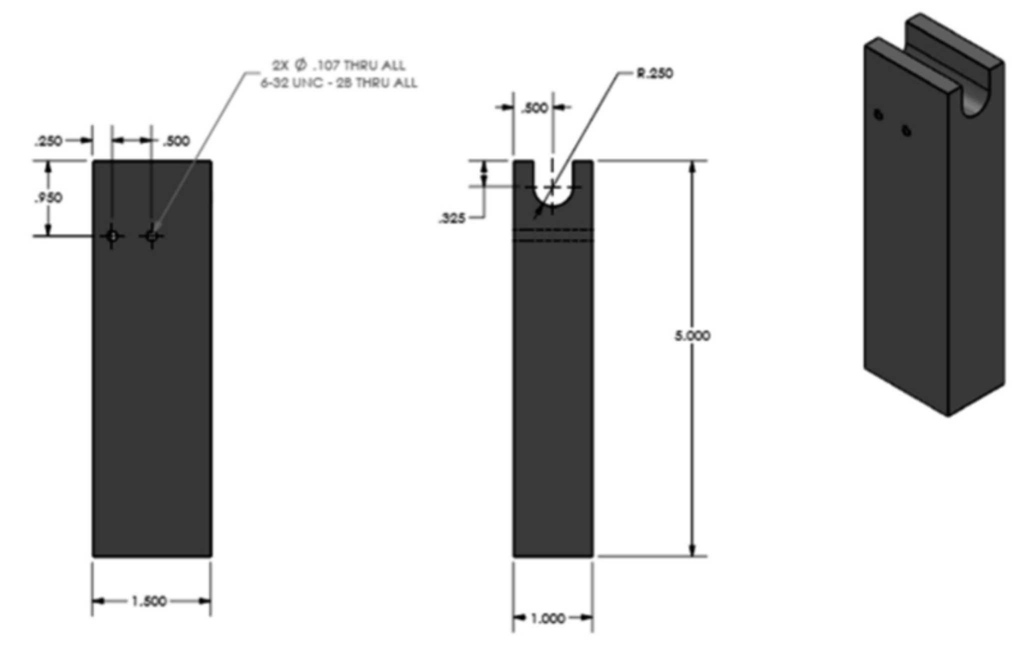



Figura 3.14. Dibujo de soporte para ensamble con cinta adhesiva de identificación. Fuente: Elaboración propia.

Ya sea durante la etapa de diseño del producto o posteriormente, el diseñador debe considerar aspectos del área de manufactura en términos de variables de proceso (VP). Estas consideraciones son conocidas como diseño para manufactura. Los diseñadores deberán poner especial atención a los problemas de producción que han sido enfrentados en los años anteriores; deben tener en mente la idea de que un diseño competente deberá ser amigable con su posterior proceso de fabricación.

Es importante recalcar que, en cualquier momento durante el proceso de diseño, el diseñador puede cambiar de opinión y volver al principio y rehacer totalmente el bosquejo, incluyendo la modificación de RF, PD y VP. El diseñador debe ir, entonces, al paso de la implementación, incluyendo detalles del método de fabricación, programación, costo y recursos humanos necesarios. Si la tarea ha sido efectuada de acuerdo a la metodología, esta etapa será de muy fácil puesta en práctica.

En algún momento dentro del proceso del diseño, el rango del mismo y el del sistema debe ser estimado para determinar cuáles PD son la mejor opción. Algunas veces es prácticamente estimar el rango del sistema sin la construcción de un prototipo, pero el esfuerzo invertido en estimarlo traerá enormes beneficios a la hora de decidir el mejor diseño. Si el rango del sistema no pudiera ser establecido, los diseñadores deben trabajar con el valor nominal y las tolerancias establecidas en el requerimiento funcional, lo cual es equivalente a trabajar con el rango del diseño. El establecimiento de estos rangos es necesario para la comprobación del axioma de información.

Después de que el diseño ha sido completado, se debe regresar a las necesidades originales del cliente (o atributos) y evaluar el diseño desde el punto de vista del cliente. Para realizar esta evaluación de manera más objetiva, es necesaria la utilización de los resultados obtenidos durante la fase de detección de necesidades cliente (QFD, método Kano, etcétera).

El *benchmarking* es una buena práctica si el producto a ser diseñado va ser vendido compitiendo con otros productos existentes en el mercado. Es conveniente que el *benchmarking* se efectúe en las últimas etapas del diseño si lo que se anda buscando es un producto innovador o en caso contrario, durante las primeras etapas si el diseño es de un producto bastante convencional.

El proceso de diseño efectuado bajo la guía de la metodología del Diseño Axiomático puede aparentar un esfuerzo extra de tiempo en las etapas tempranas del diseño, pero salvará un gran porcentaje de tiempo durante las etapas de ejecución. El uso de esta metodología garantizará tiempos de desarrollo cortos, productos más confiables y costos más bajos.

## RESUMEN

Los pasos básicos de la metodología del Diseño Axiomático desarrollada por Suh fueron mostrados de manera resumida en este capítulo. No obstante que la metodología del diseño depende de las tareas específicas asociadas al objetivo del diseño, así como a su campo de aplicación, los quince pasos mostrados en este capítulo permitieron de manera estructurada y científica el diseño de un dispositivo a prueba de error que evita la falta de cinta adhesiva de identificación en un producto.

Para facilitar la comprensión de la metodología, el ejemplo utilizado a lo largo de este capítulo nos permitió ver cómo, partiendo desde la identificación de las necesidades del cliente y pasando por las diferentes etapas establecidas por Suh en su metodología, logramos obtener un producto final que satisface los Requerimientos Funcionales establecidos.

## REFERENCIAS


DDS Media (2014). Tecnología, actualidad y Gadgets. Ya a 31 años de que salió a la venta el primer celular de la historia. Recuperado de http://www.ddsmedia.net/blog/2014/03/ya-a-31-anos-de-que-salio-a-la-venta-el-primer-celular-de-la-historia/#.

FICALORA, J. P. y Cohen, L. (2009). *Quality function deployment and Six Sigma, second edition: A* QFD *handbook*. Pearson Education.

KOGYO, N. (1988). *Poka-Yoke: Improving product quality by preventing defects*. Portland, Oregon: Productivity Press.

PARDINAS, F. (1989). *Metodología y técnicas de investigación en ciencias sociales*. Siglo XXI. Recuperado a partir de https://books.google.com.mx/books?id=PDqKweTKbhUC.

SHINGO, S. (1986). *Zero quality control: Source inspection and the Poka-Yoke system*. Portland, Oregon: Productivity Press.

SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

SUH, N. P. (2001). *Axiomatic design: Advances and applications*. Oxford University Press.

TURMERO Astros, Iván José (s. f). Técnicas de mejora de diseño. Recuperado de http://www.monografias.com/trabajos97/tecnicas-mejo-ra-diseno/tecnicas-mejora-diseno.shtml.

# 4. DISEÑO UNITARIO Y MÚLTIPLE

## DISEÑO UNITARIO

El término unitario se define como perteneciente o relativo a la unidad, o en su defecto, que tiene unidad. En tanto, por unidad se designa a la propiedad que posee todo ser y que implica que este no puede dividirse sin que su esencia se vea alterada o destruida por esta situación. El término unitario se refiere a cualquier cosa que esté formada por un solo elemento. Esta última definición es la que se utiliza para referirse al diseño unitario, es decir, el diseño que contiene solo un requerimiento funcional (RF). Una definición formal sería: "Diseño unitario es el caracterizado por un solo RF".

En este capítulo se presenta la teoría del Diseño Axiomático cuando solo un requerimiento tiene que ser satisfecho; como consecuencia de ello, no debe haber ninguna descomposición. Cuando se trabaja con diseños unitarios es necesario solo enfocarse en el segundo axioma del Diseño Axiomático, el axioma de información, ya que el primer axioma, el axioma de independencia, es siempre satisfecho debido a que, al existir solo un requerimiento, no hay posibilidad de que exista dependencia.

## INTRODUCCIÓN AL PENSAMIENTO FUNCIONAL

Cuando alguien alude a la metodología del Diseño Axiomático, se refiere a una manera diferente de ver la actividad de diseñar. Esta nueva visión consiste principalmente en que el diseño se ve como una actividad científica, en lugar de solamente empírica. Uno de los principales conceptos que vuelven a esta metodología una actividad científica es el pensamiento funcional, es decir, el método de conceptualizar el diseño con base en las funciones que se desea que realice o en la funcionalidad del mismo.

El pensamiento funcional centra a los diseñadores en la idea de que deben pensar el diseño en términos de Requerimientos Funcionales. Para pensar de este modo, primero se deben plantear algunas preguntas: ¿Qué es lo que se quiere lograr? ¿Se está pensando en la funcionalidad? ¿Se tiene claro cuál función se necesita que el concepto de diseño desempeñe?

Cuando se plantean las preguntas anteriores, uno se enfoca en lo que quiere realmente que el producto o proceso realice. Es decir, ¿cómo se quiere que funcione? Otra ventaja del pensamiento funcional es que ayuda a pensar en todas las características de funcionalidad que se requiere que el producto o proceso posea, y así evitar se quede solo en su función principal. Por ejemplo, si se piensa en un producto que actualmente esté considerado como un artículo innovador, sin duda el teléfono celular entra en esta categoría; incluso, algunos de ellos actualmente reciben el nombre de inteligentes, pero, ¿siempre fue así?

### Ejemplo 4.1 Teléfono celular

El teléfono celular es un producto que indudablemente no fue diseñado originalmente bajo el pensamiento funcional del Diseño Axiomático. Martin Cooper, considerado el padre de la telefonía celular, cuando introdujo en Estados Unidos el primer radioteléfono en 1973 (ver figura 4.1), época en que trabajaba para la empresa Motorola, sin duda solo consideró que la función debía ser comunicarse de manera remota, al igual que los teléfonos fijos, pero de manera inalámbrica. Consideremos que

estamos diseñando un teléfono celular bajo el pensamiento funcional: ¿Cuáles serían algunos de los Requerimientos Funcionales que podrían ser establecidos para mejorar el diseño original de Cooper?

A continuación se mencionan algunos:

- $RF_1$: ligero
- $RF_2$: pequeño
- $RF_3$: sin antena externa



Figura 4.1. Primer teléfono celular. Adaptado de DDSmedia, 2014.

Para tener claro cómo el Diseño Axiomático se introduce en el pensamiento funcional, se debe dar un vistazo a los conceptos básicos establecidos por Nam P. Suh. En el capítulo anterior se presentaron los conceptos generales de esta metodología y aquí se resumen de la siguiente manera.

El ímpetu para desarrollar el Diseño Axiomático fue la creación de bases científicas dentro del campo del diseño, para hacer de este y la manufactura una disciplina académica. Desde entonces, las ideas básicas del Diseño Axiomático han sido aplicadas en muchas áreas, como productos, procesos, sistemas y diseños organizacionales.

- Cuatro dominios forman el universo axiomático: el dominio del cliente, el dominio funcional, el dominio físico y el dominio del proceso.
- En el dominio del cliente es necesario tener bien claro las necesidades del cliente.
- Para establecer los Requerimientos Funcionales (RF) y las restricciones (Rs) se deben trasladar las necesidades del cliente, establecidas dentro del dominio del cliente, al dominio funcional. A esta actividad se le conoce como mapear.
- Para establecer los Parámetros de Diseño (PD) que satisfagan los Requerimientos Funcionales (RF) en el caso del diseño del producto y para establecer las variables de proceso (VP) que satisfagan los Parámetros de Diseño (PD) en el caso del diseño del proceso, se debe mapear del “qué” en el dominio funcional al “cómo” en el dominio físico.
- Durante el proceso de mapeo, el axioma de independencia debe ser satisfecho.
- Para descomponer los RF, PD y VP se debe zigzaguear entre los dominios.
- A través del proceso de descomposición, establecer las jerarquías del diseño hasta que el diseño esté terminado.
- Optimización del diseño no acoplado o desacoplado a través de la eliminación de la desviación y la reducción de la variación de los PD y VP, con el fin de desarrollar un diseño robusto.
- Cuando existe más de una solución que satisfaga los RF, seleccionar la mejor opción basándose en el axioma de la información.

El postulado básico del Diseño Axiomático es que hay axiomas fundamentales que gobiernan el proceso del diseño. Siendo más específicos, dos axiomas fueron identificados, examinando los elementos comunes siempre presentes en buenos diseños, sea para diseñar productos, procesos o sistemas.

## Axioma 1: Axioma de independencia. Mantener la independencia de los Requerimientos Funcionales

Los RF son definidos como el mínimo grupo de Requerimientos Funcionales que el diseño debe satisfacer. Los vectores RF son la descripción de las metas del diseño sujetas a restricciones. La restricciones proveen las fronteras sobre los diseños aceptables y difieren de los RF en que ellas no tienen que ser independientes.

## Axioma 2: Axioma de información. Minimizar el contenido de información

La información es definida en términos del contenido de información a la cual es referida, en su forma más simple, como la probabilidad de satisfacer un RF dado. El mejor diseño es aquel que tiene la mayor probabilidad de satisfacer los RF.

Estos dos axiomas componen los cimientos para tomar las decisiones correctas al momento de diseñar, así como para seleccionar el mejor diseño. Otro importante concepto que los diseños deben satisfacer, además de los axiomas de independencia y de información, son las restricciones (Rs). Estas proveen las fronteras o límites en un diseño y pueden ser de dos tipos: restricciones de entrada y restricciones del sistema.

## DIFERENCIA ENTRE EL DISEÑO UNITARIO Y EL DISEÑO MÚLTIPLE

Dentro del enfoque axiomático se pueden distinguir dos tipos de diseños según el número de Requerimientos Funcionales que el diseño contenga y se les han designado los nombres de diseño unitario y diseño múltiple.

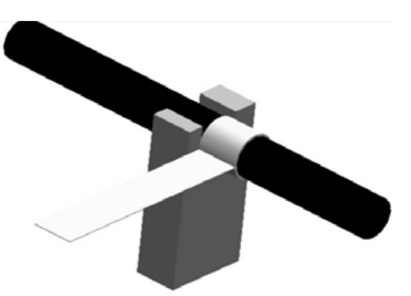
Como ya se mencionó anteriormente, el diseño unitario contiene únicamente un requerimiento, y como su nombre lo sugiere, el diseño múltiple contiene dos o más Requerimientos Funcionales. La diferencia principal entre estos dos tipos de diseño es que cuando existe un requerimiento funcional (RF), el axioma de independencia es siempre satisfecho, así que problemas de acoplamiento no existen; por lo tanto, solo debemos enfocarnos en satisfacer el segundo axioma, lo cual puede lograrse reduciendo al mínimo el contenido de información, o lo que es lo mismo, incrementando la probabilidad de que el único requerimiento funcional (RF) sea satisfecho. Con base en lo anterior, se puede concluir que cuando existe únicamente un requerimiento funcional (RF) y solo este debe de ser alcanzado dentro de las fronteras determinadas por las restricciones, la tarea de diseño se vuelve muy simple. Bajo este orden de ideas, lo realmente importante en un diseño unitario es cómo seleccionar el parámetro de diseño (PD) y la variable de proceso (VP) apropiados de modo que la solución del diseño sea considerada un diseño robusto.

Dentro del área de manufactura de productos industriales, se han diseñado una infinidad de dispositivos o fixturas para el ensamblaje de productos. Durante el diseño de estos herramentales y equipos, un requerimiento importante a considerar es la utilización de funciones que prevengan o eviten el error. Un ejemplo de cómo esta importante función es utilizada para seleccionar el parámetro de diseño PD adecuado es ilustrado en el ejemplo 4.2 (ninguna restricción de entrada ha sido establecida).

## Ejemplo 4.2. Diseño de dispositivo a prueba de error para evitar la falta de cinta adhesiva

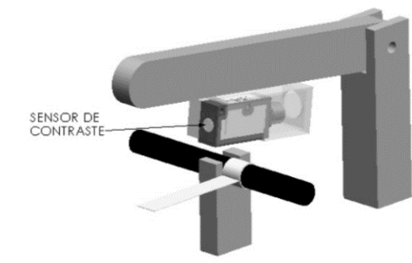
Se desea diseñar un dispositivo a prueba de error, mejor conocido en el área industrial como *poka yoke,* para evitar que durante la manufactura de un producto falte la cinta adhesiva, y para su diseño se establece un único RF, el cual puede ser descrito de la siguiente manera:

RF**:** Evitar falta de cinta adhesiva

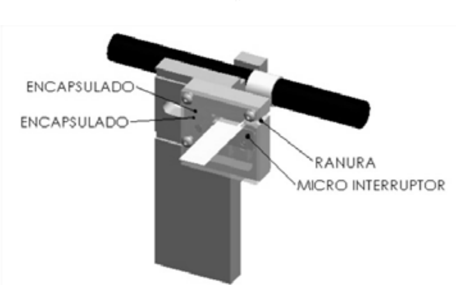


El producto en cuestión es una manguera de hule a la que, para su identificación, se agrega una cinta de papel en forma de bandera. La instalación de la cinta adhesiva es efectuada por un operario de manera manual. Para poder cumplir con este requerimiento, el diseñador puede seleccionar entre diferentes alternativas o PD que pueden satisfacer el RF. Para este ejemplo se consideran solo dos PD.

PD**:** sensor de contraste.




PD**:** sensor mecánico.




Cualquiera de los dos Parámetros de Diseño cumple con la función de evitar la falta de cinta adhesiva. El primer impulso, sin un análisis previo, supone inclinarse por el sensor de contraste, ya que al ser electrónico nos sugiere que su efectividad es mayor, pero realmente es lo contrario. Para comprender mejor este ejemplo, a continuación se explica el funcionamiento de cada uno de ellos.

- El sensor de contraste es un dispositivo electrónico que responde al cambio en la intensidad de la luz. Estos sensores requieren de un componente emisor que genera la luz y un componente receptor que “ve” la luz generada por el emisor. Todos los diferentes modos de sensado se basan en este principio de funcionamiento. Están diseñados especialmente para la detección, clasificación y posicionado de objetos; la detección de formas, colores y diferencias de superficie, incluso bajo condiciones ambientales extremas.

  Este tipo de dispositivos son generalmente muy eficientes, pero tienen el inconveniente de que cuando son utilizados para sensar un componente blanco sobre una superficie negra, el brillo de la luz reflejada sobre la superficie negra algunas veces “engaña” al sensor y detecta el brillo como si fuese el componente blanco, resultando en un error de detección.

– El sensor mecánico es un dispositivo con un microinterruptor encapsulado con una ranura que solo permite la entrada de la cinta adhesiva a su interior para que esta lo active. El microinterruptor se encuentra protegido de activaciones por cualquier otro elemento.

Con apoyo en esta descripción del funcionamiento de cada uno de los PD mencionados en este ejemplo, se puede concluir que la precisión del sensor mecánico es mayor que la del sensor de contraste, por lo que la probabilidad de que satisfaga el requerimiento de evitar la falta de cinta adhesiva es mayor que con el sensor de contraste, por ello fue el parámetro de diseño seleccionado.

En algunas ocasiones existen más de dos PD que pueden satisfacer a un RF dado. Cuando esto ocurre, la selección del PD debe hacerse como se ha mencionado antes, es decir, el que tenga menos contenido de información, siempre y cuando al seleccionarlo no atente contra alguna restricción de entrada o de sistema (Rs) (Houshmand y Jamshidnezhad, 2002).

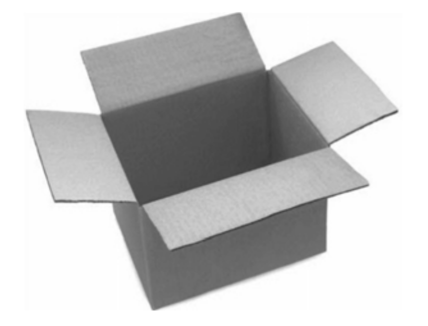
Cuando en un diseño se tiene presente alguna Rs, el diseño debe satisfacer tanto a los RF como a las Rs. En términos generales, es mejor ignorar las Rs durante la primera etapa del mapeo del proceso, entre el dominio funcional y el dominio físico o entre el dominio físico y el dominio del proceso, con excepción de casos especiales. Una vez que un PD apropiado se ha seleccionado, se debe regresar y verificar si alguna restricción ha sido violada. Para algunas Rs, como por ejemplo el costo, el diseño debe ser completado antes de que pueda ser revisado contra las restricciones y mejorado para satisfacerlas. Sin embargo, a través del proceso de diseño, los diseñadores deberían normalmente considerar las Rs implícitas cuando seleccionan los PD (Houshmand y Jamshidnezhad, 2002).

El ejemplo 4.3 muestra cómo se deben considerar las restricciones de entrada y de sistema mientras se está en el proceso de selección del parámetro de diseño más adecuado.

## Ejemplo 4.3. Diseño de proceso de conteo en estación de empaque

Supongamos que se está diseñando el proceso de conteo en una estación de empaque en una célula de manufactura, y se debe evitar que durante esta actividad falte producto dentro del empaque. Actualmente, esta actividad es manual y realizada por un operario y no por una máquina. Para impedir que esto suceda, se establece una restricción de entrada, la cual consiste en poner un dispositivo de conteo en empaque. Sin embargo, este debe costar menos de 350 pesos. Además, se establece un único RF, el cual se describe de la siguiente manera:

RF**:** Empacar la cantidad correcta.



En este ejemplo, se necesita seleccionar un PD que satisfaga el RF establecido. Considerando que el empaque se realiza de manera manual, a continuación se presentan tres diferentes PD que pueden satisfacer esta condición.

PD: Hoja de conteo



Ilustración: Mayer Group

PD: Contador mecánico




Fotografía: eCalidad.

PD: Contador electrónico




Fotografía: LedControls.

Cualquiera de los tres PD mostrados anteriormente cumple con la función de ayudar al operador a empacar la cantidad correcta. Analizando las características de cada uno de ellos, se puede establecer que la precisión del contador electrónico es mayor que cualquiera de los otros dos PD, por ende, la probabilidad de que satisfaga el requerimiento de empacar la cantidad correcta es mayor, y por lo tanto, este debería ser el parámetro de diseño seleccionado. Sin embargo, antes de tomar esta decisión se debe de revisar la restricción de entrada establecida en este diseño, la cual fue que el PD no debe exceder los 350 pesos. Esta frontera de costo limita la selección del contador electrónico, ya que su costo es mayor, por lo que se debe optar por elegir el contador mecánico como el parámetro de diseño y así satisfacer el requerimiento funcional establecido. Además, su precisión es mayor que la hoja de conteo y su costo no excede los 350 pesos.

Los ejemplos anteriores permiten visualizar cómo se puede satisfacer el axioma de información a través de la selección un PD de manera conceptual. Es decir, usando únicamente nuestro conocimiento sobre las características de los PD. Sin embargo, desgraciadamente no siempre es tan fácil elegir el adecuado, por lo que es necesario realizar esta selección de manera cuantitativa.

Para satisfacer el axioma de la información de manera cuantitativa, la única condición que se debe cumplir es que el rango del sistema (RS) de un requerimiento funcional (RF) esté completamente dentro de su rango de diseño (RD) especificado. Cuando esto sucede, la probabilidad de éxito es igual a 1 y la información requerida es cero. Esta condición puede ser satisfecha si el sesgo es muy pequeño (casi cero) y si el rango del sistema (varianza) es mucho menor que el rango del diseño.

Antes de continuar, es necesario definir qué es el rango del sistema (RS) y que es el rango de diseño (RD). El rango del sistema es lo que el sistema es capaz de entregar, en otras palabras, lo que el sistema diseñado puede hacer, mientras que el rango del diseño es lo que el diseñador desea alcanzar en términos de tolerancias o límites de especificación.

## REDUCCIÓN DE LA VARIANZA

La varianza es una medida estadística de la variabilidad de una función de densidad de probabilidad (FDP). La variabilidad es causada por un número de factores, como el ruido, el entorno y variaciones aleatorias en los Parámetros de Diseño. En un diseño unitario, el prerrequisito para la reducción de varianza es que se satisfaga el axioma de independencia.

Según Suh (2001), existen cinco maneras en que se puede lograr que el rango del sistema (RS) esté contenido dentro del rango del diseño (RD):

- Reducir la rigidez (los coeficientes que relacionan a los PD y las RF) del sistema. Si el rango del diseño especificado es, por ejemplo, $\Delta$RF y el rango del sistema es *rs* (RF), entonces el contenido de información es cero si $\Delta$RF > *rs* (RF) y el sesgo *b* es igual a cero.

  Dentro de la metodología del Diseño Axiomático, ¿cómo se logra que un diseño sea robusto? Un diseño robusto se define como un diseño que siempre satisface los Requerimientos Funcionales, es decir, $\Delta$RF > *rs* (RF) y *b* = 0, aun cuando está presente una variación aleatoria grande en los Parámetros de Diseño $\delta$PD.

- La tolerancia especificada: $\Delta$PD es determinada por la magnitud del coeficiente $A_{11}$ (rigidez del diseño) y la magnitud del rango del diseño de RF, que es, $\Delta PD = \Delta RF / A_{11}$. El concepto es hacer que la tolerancia especificada $\Delta$PD sea tan grande como sea posible, de manera que el efecto de la variación aleatoria del PD en el RF sea siempre mucho más pequeño que el rango de diseño especificado $\Delta$RF.

  Basado en lo expuesto, se puede decir que la rigidez del sistema debe reducirse para mejorar la robustez del diseño, incluso cuando existe una variación aleatoria.

- Hacer que el sistema sea totalmente insensible (por ejemplo, inmune) a las variaciones aleatorias de los PD o variables de proceso (VP).

  ¿Qué significa que un diseño sea inmune a la variación? Cuando un requerimiento funcional dado, por ejemplo, $RF_1$ debe permanecer constante e insensible a la variación aleatoria de su correspondiente parámetro de diseño $PD_1$, la solución de diseño deseada es aquella que hará que el requerimiento funcional $RF_1$ sea inmune a la variación del parámetro de diseño $PD_1$. Esto puede ser alcanzado haciendo $A_{11}$ igual a cero en el valor establecido por el requerimiento funcional $RF_1$ y el parámetro de diseño $PD_1$, incluso cuando el parámetro de diseño $PD_1$ fluctúe alrededor, o derive del valor de establecido.

- Si el diseño es redundante, hacer que los PD y VP sean constantes, de modo que no puedan agregar varianza al sistema.

  Cuando un diseño es redundante, la variación de los RF puede ser reducida identificando los PD clave y previniendo los PD adicionales de la variación. Por ejemplo, fijando los valores a estos últimos, compensar la variación aleatoria introducida por PD adicionales de un diseño redundante a través del ajuste del PD seleccionado. Una manera de reducir la varianza de los RF es reducir la variación aleatoria de los parámetros de entrada, de manera que contribuyan al total de la variación aleatoria de los RF.

- Hacer el rango de diseño más largo, siempre y cuando pueda ser hecho sin comprometer los Requerimientos Funcionales del diseño.

  Como se ha establecido anteriormente, cuando solo existe un RF, el axioma de independencia es siempre satisfecho, así que problemas de acoplamiento no existen, pero, ¿esto es siempre así en los diseños unitarios? ¿Puede un diseño unitario convertirse en un diseño múltiple? En algunas ocasiones, durante la actividad de diseño, un diseño unitario puede convertirse en un diseño múltiple cuando el único RF debe ser descompuesto para que su implementación sea posible. La descomposición permite el desarrollo del siguiente nivel, en el cual el diseño es más detallado. Cuando más de un nivel inferior debe ser satisfecho, el axioma de independencia, AI, también debe ser satisfecho. Esto debe cumplirse durante la selección de los PD que satisfagan los RF de los niveles inferiores.

La metodología para tratar con un diseño unitario puede ser igualmente bien aplicada a los diseños múltiples si el diseño es completamente no acoplado. Si el diseño es un diseño múltiple desacoplado, se puede aplicar un proceso de pensamiento similar durante el proceso de diseño, pero con ciertas modificaciones en la secuencia de implementación de los RF. Cómo es efectuada esta actividad se mostrará más adelante en la sección de diseños múltiples.

## DISMINUCIÓN AL MÍNIMO DEL CONTENIDO DE INFORMACIÓN

El axioma de información establece que se debe minimizar el contenido de información. La forma de medirlo es con base en la probabilidad de satisfacer el RF o, dicho de otra manera, la información necesaria para satisfacer totalmente un RF. El contenido de información es medido a través de la intersección del RD especificado por el diseñador y el rango del sistema RS, que es lo que la solución implementada puede alcanzar. A esta intersección se le denomina rango común (RC).

Un diseño robusto es consecuencia del axioma de información (Ainf). Dentro de la metodología del Diseño Axiomático se han establecido varios corolarios relacionados con el mismo. Por ejemplo, mencionar:

- Corolario 3. La integración de las partes físicas
- Corolario 4. Utilizar estandarización
- Corolario 5. Uso de simetría
- Corolario 6. Rango de diseño grandes
- Corolario 7. Diseño no acoplado con menos información

La selección de los PD debería estar, además, basada en la medición del contenido de información. El mejor valor para el PD seleccionado puede obtenerse a través de la minimización del contenido de información. Cuando existen varios RF, el contenido de información puede utilizarse como una herramienta de toma de decisiones donde es necesario seleccionar el sistema con el mínimo contenido de información (Cochran y Reynal, 1996).

En el capítulo anterior, el contenido de información *I* fue definido en términos de la probabilidad *Pi* de que un RF dado sea satisfecho. La ecuación 4.1 muestra esta relación:

$$I = -\log_2 P_i \qquad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde *Pi* = probabilidad {PDi satisface RFi}.

Si RF es una variable continua, la probabilidad de satisfacer el RF dentro del rango de diseño puede ser expresada como:

$$P_i = \int_{rd^1}^{rd^u} P_s(RF_i)\,dRF_i \qquad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde $P_S(RF_i)$ es la función de densidad de probabilidad del sistema para $RF_i$. En la figura 4.2, el área del rango común ($A_{rc}$) es igual a la probabilidad de éxito.

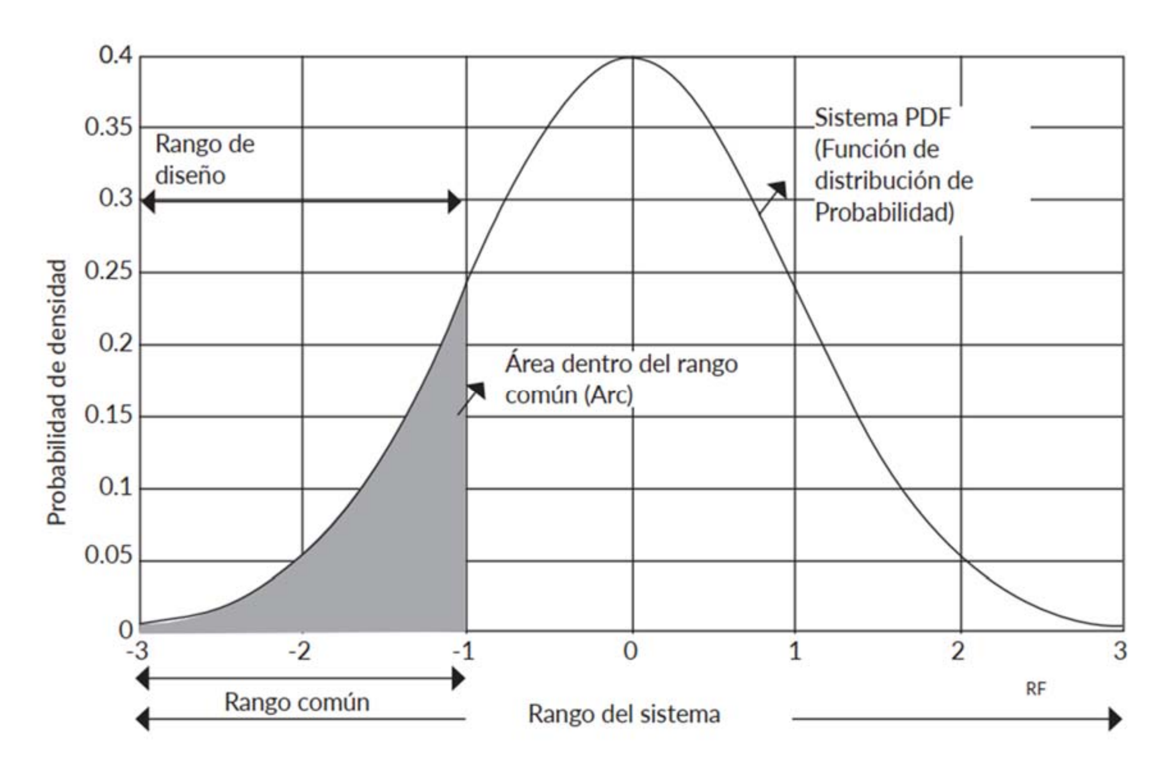



Figura 4.2. Rango del diseño, rango del sistema, rango común y la función de densidad de probabilidad para un RF. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Celik *et al.* 2007).

$$I = log_2 \left(\frac{1}{A_{rc}}\right)$$ Ecuación 4.3

Para el caso donde la función de densidad de probabilidad es uniforme, *Pi* puede ser escrita como:

$$P_i = \frac{RC}{RS}$$ Ecuación 4.4

Por lo tanto, el contenido de información es igual a:

$$I = log_2 \frac{RS}{RC}$$ Ecuación 4.5

La figura 4.3 muestra que la intersección entre el rango de diseño y el rango del sistema es la región aceptable donde la solución existe.

Para minimizar el contenido de información, se debe eliminar el sesgo y reducir la varianza, de tal manera que el RS esté dentro del RD. El ejemplo 4.4 muestra cómo Suh establece la relación entre probabilidad y contenido de información en un diseño unitario.

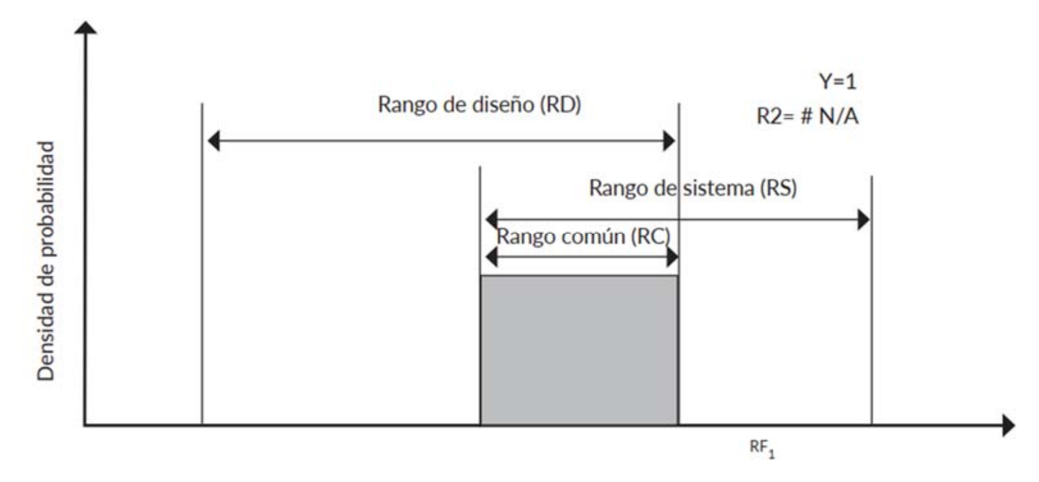



Figura 4.3. Rango del diseño, rango del sistema, rango común y la función de densidad de probabilidad uniforme para un RF. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Celik *et al.* 2007).

## Ejemplo 4.4. Probabilidad y contenido de información en un diseño unitario

El rango de diseño y el rango del sistema de un diseño unitario son mostrados en la figura 4.4. Determine la probabilidad de éxito y el contenido de información del diseño.

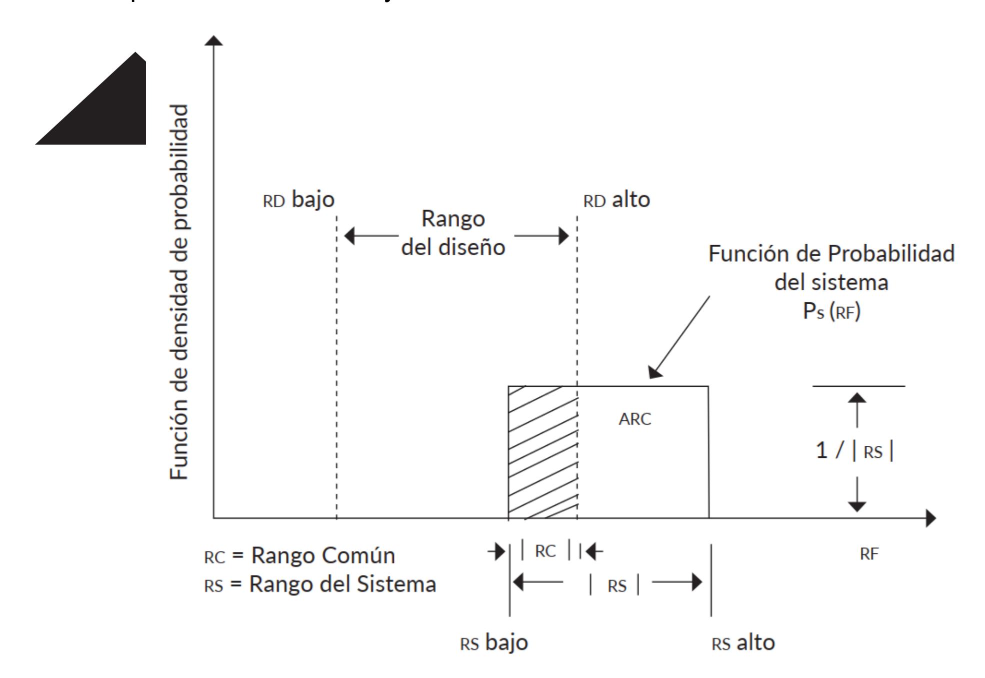



Figura 4.4. Rango del diseño y rango del sistema de un diseño unitario. Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad *P* de satisfacer el requerimiento funcional RF está dada por área del rango común ($A_{rc}$), la cual, en este caso, para una distribución uniforme es:

$$P = A_{rc} = \int P_S \text{ (RF)} \, d\text{RF} = \frac{\text{rd}_{\text{alto}} - \text{rs}_{\text{bajo}}}{|\text{rs}|} = \frac{|\text{rc}|}{|\text{rs}|} \qquad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde |rc| es el rango común, |rs| es el rango del sistema y $rs_{bajo}$ es la frontera baja del rango del sistema.

El contenido de información es:

$$\mathrm{I} = \frac{|\mathrm{rs}|}{|\mathrm{rc}|}$$ Ecuación 4.7

En el ejemplo 4.4, es asumido que cualquier punto en el RD es igualmente aceptable. Sin embargo, en ciertas situaciones, un valor para el RF podría ser más deseable que otros. Por ejemplo, las necesidades del cliente podrían ser satisfechas mejor si el RF está cercano al valor establecido como meta.

El contenido de información puede ser reducido cuando el diseño es no acoplado o bien cuando es desacoplado; por ejemplo, cuando el diseño satisface el axioma de independencia AI.

## DISEÑO MÚLTIPLE

En esta sección se tratará con diseños que envuelven dos o más RF en cualquier nivel jerárquico. En términos reales, prácticamente todos los diseños pertenecerán a esta categoría. La principal característica que distingue un diseño múltiple de un diseño unitario es la necesidad que el diseño múltiple tiene de satisfacer el axioma de independencia. Satisfacer el AI es en esencia mantener los RF independientes. Esto se logra donde se puede establecer que el diseño es no acoplado y por lo tanto cumplimos con el primer axioma del Diseño Axiomático.

Cuando se trabaja con diseños múltiples, se pueden además encontrar diseños que son acoplados, los cuales pueden ser rediseñados para ser no acoplados o desacoplados. Al igual que en los diseños unitarios, los diseños múltiples deben satisfacer el axioma de información, el cual requiere que se minimice el contenido de información. El contenido de información en un diseño múltiple puede ser reducido cuando satisfacemos la condición de independencia.

La independencia entre los RF puede ser evaluada en dos mediciones cuantitativas: reangularidad “R” y semangularidad “S”.

Reangularidad mide la ortogonalidad entre los PD (interdependencia entre PD) y se calcula con base en la ecuación 4.8, mientras que la semangularidad mide la relación angular entre los ejes correspondientes de PD y RF y puede ser considerada como la medida de la correlación entre un RF y un conjunto de PD, y se pude calcular de acuerdo con la ecuación 4.9 (Suh, 1990).

$$R = \Pi_{\substack{\mathrm{i=1-1} \\ \mathrm{j=1+i,n}}} \left[1 - \frac{(\sum_{k=1}^{n} D\,M_{ki} DM_{ki})^2}{(\sum_{k=1}^{n} DM_{ki}^2)^2 (\sum_{k=1}^{n} DM_{kj}^2)^2}\right]^{1}/_{2}$$ Ecuación 4.8

$$S = \Pi_{j=1}^{n} \left[\frac{|DM_{jj}|}{(\sum_{k=1}^{n} A_{kj}^2)^{1/2}}\right]$$ Ecuación 4.9

La complejidad de un diseño está relacionada con su contenido de información y con su independencia. Sin embargo, cuando se logra satisfacer el axioma de independencia y el axioma de información, se puede reducir la complejidad.

El modelo más sencillo de un diseño múltiple es el diseño formado por dos RF. El ejemplo 4.5 muestra este tipo de diseño.

## Ejemplo 4.5. Diseño de abrelatas / botella

Este ejemplo consiste en suponer que se necesita diseñar un abrelatas que cumpla con los siguientes Requerimientos Funcionales para poder abrir una botella:

$RF_1$: Abra las botellas de bebida



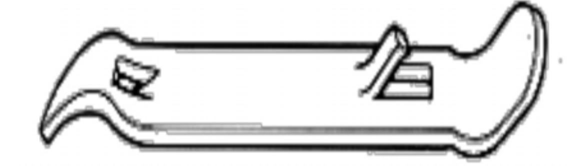
$RF_2$: Abra las latas de comida




Para los dos requerimientos anteriores se deben establecer dos PD que satisfagan de manera independiente cada uno de los RF establecidos. Algunos de los cuales podrían ser los siguientes:

$PD_1$: Destapador

$PD_2$: Abrelatas



Si el requerimiento es no realizar estas dos funciones simultáneamente, entonces este dispositivo físicamente integrado satisface dos requisitos independientes.

El acoplamiento funcional no se debe confundir con el acoplamiento físico. El axioma de independencia requiere que las funciones del diseño sean independientes una de otra, no la parte física. Además, el axioma de información sugiere que, en la integración física, es deseable reducir el contenido de información.

## EL AXIOMA DE INDEPENDENCIA Y EL AXIOMA DE INFORMACIÓN: SU IMPLICACIÓN PARA DISEÑOS MÚLTIPLES

Para entender el significado del axioma de independencia en un diseño múltiple, se debe repasar la definición de Requerimientos Funcionales (RF). Estos se definen como el mínimo grupo de RF que un diseño debe satisfacer. Los vectores RF son la descripción de las metas del diseño sujetas a las restricciones. Las restricciones proveen las fronteras sobre los diseños aceptables y difieren de los RF en que ellas no tienen que ser independientes.

Ahora bien, el axioma de independencia establece que los RF deben de ser siempre independientes de otros, para lo cual se debe seleccionar el apropiado PD. Durante la actividad del diseño, los PD son concebidos de los RF. Esta asociación es mapeada en una matriz llamada matriz de diseño. Los RF son representados en la matriz de diseño como líneas y los PD son representados como columnas. La relación entre un RF y un PD está representada en la matriz de diseño como un elemento no-cero (ver ecuación 4.10). Un elemento en la matriz de diseño igual a cero corresponde a un PD no relacionado con un RF.

$$\begin{Bmatrix} RF1 \\ RF2 \\ RF3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1 \\ PD2 \\ PD3 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 4.10

El proceso de mapeo entre los dominios puede ser expresado matemáticamente en términos de vectores característicos que definen las metas y soluciones del diseño. Para un nivel de jerarquía del diseño dado, un conjunto de RF que define la meta del diseño constituye el vector RF en el dominio funcional. De igual manera, el conjunto de Parámetros de Diseño en el dominio físico que son seleccionados para satisfacer un RF constituyen el vector PD. La relación entre estos dos vectores está dada por la ecuación 4.11.

$$\{\mathrm{RF}\} = [\mathrm{A}]\{\mathrm{PD}\}$$ Ecuación 4.11

Donde [A] es llamada la matriz de diseño que caracteriza el diseño del producto. La ecuación 4.11 representa la ecuación del diseño. La ecuación 4.12 representa la matriz del diseño para un diseño con tres RF y tres PD.

$$[A] = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}$$ Ecuación 4.12

La independencia de un RF se puede ver y medir con la matriz de diseño. Esta matriz puede asumir tres configuraciones básicas con respecto a la independencia de los RF; estas configuraciones son: no acoplado, desacoplado y acoplado. La matriz de diseño no acoplado representa un diseño con RF independientes, es decir, que cada RF se satisfaga con un PD único. Este tipo de diseño satisface el axioma de independencia y se puede considerar un buen diseño. La matriz de diseño desacoplado contiene coeficientes ($A_{ij}$) superiores o inferiores que representa diseños desacoplados, lo que no es ideal pero es una solución aceptable, ya que tiende a tener control en la independencia. La matriz de diseño acoplado se obtiene cuando al menos un mapeo está acoplado, es decir, que dos RF se satisfacen con un PD único, lo que representa un diseño malo e inaceptable. En la figura 4.5 se pueden ver las diferentes configuraciones de matrices.

$$\begin{bmatrix} A11 & 0 & 0 \\ 0 & A22 & 0 \\ 0 & 0 & A33 \end{bmatrix}$$

Diseño no acoplado

$$\begin{bmatrix} A11 & 0 & 0 \\ A21 & A22 & 0 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}$$

Diseño desacoplado

$$\begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}$$

Diseño acoplado

Figura 4.5. Matrices de diseño.

El proceso de Diseño Axiomático se concentra en la satisfacción de los RF. Estos describen las metas del diseño mientras que los PD son los "cómos" del diseño que satisfacen un específico RF.

El axioma de información indica que el diseño con la probabilidad más alta de éxito es el mejor diseño. El contenido de información representa la complejidad del diseño y se puede definir como el complemento de la probabilidad "P" de un parámetro de diseño dado, en la satisfacción de un PD con su respectivo RF. Cuando los RF son independientes, el contenido de información total para el diseño es la suma de todos los RF. El contenido de información de un RF dado puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$I = log_2\left(\frac{1}{P_i}\right) = -log_2 P_i$$ Ecuación 4.13

La información está dada en unidades de *bits* (*bit* es la unidad mínima de información empleada en informática). La función logaritmo es seleccionada, ya que el contenido de la información será aditivo cuando existan varios RF que deben ser satisfechos simultáneamente. En el caso general para RF, el contenido de la información para el sistema entero $I_{sistema}$ está representado por la siguiente expresión.

$$I_{sistema} = -\log_2 Pm \qquad \text{Ecuación 4.14}$$

El contenido de información está relacionado con las tolerancias y capacidades. La probabilidad de éxito es la probabilidad de conocer las especificaciones del diseño, las áreas de intersección entre el rango del diseño (voz del cliente) y el rango del sistema (voz del proceso).

## Ejemplo 4.6. Diseño de un soldador térmico para PVC

Para diseñar un soldador térmico se consideran los siguientes RFs que lo caracterizarán:

- $RF_1$: Caudal de aire
- $RF_2$: Temperatura de salida del aire

Los PDs que se definen para estos dos requerimientos son:

- $PD_1$: Diámetro del tubo de Salida
- $PD_2$: Potencia de la resistencia eléctrica

La relación entre estos dos vectores está dada por la Ecuación 4.11 mostrada anteriormente y representada de la siguiente forma:

$$\{\text{RF}\} = [\text{A}]\{\text{PD}\}$$

$$\begin{pmatrix} \text{Caudal de aire} \\ \text{Temperatura de salida de aire} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{A11} & \text{A12} \\ \text{A21} & \text{A22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Diámetro del tubo de salida} \\ \text{Potencia de la resistencia eléctrica} \end{pmatrix}$$

La figura 4.6 muestra el dibujo esquemático del soldador térmico de PVC.

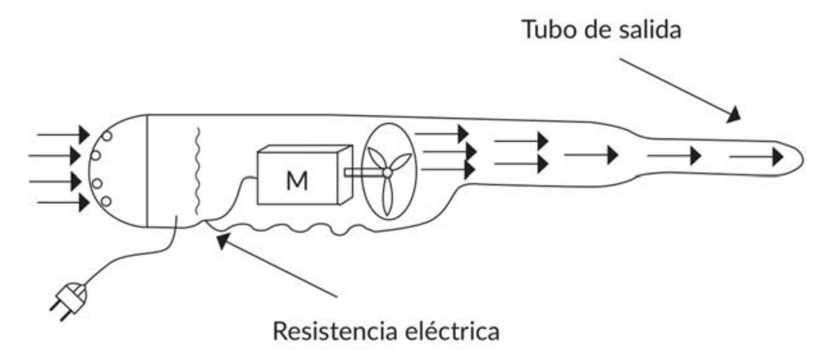



Figura 4.6. Soldador térmico de PVC. Fuente: Elaboración propia.

Para comprobar la independencia de los RF, es necesario considerar lo siguiente: si se modifica el diámetro del tubo de salida ($PD_1$) –por ejemplo, si se opta por aumentarlo–, la temperatura se incrementa. Dicho de otra forma, un mayor diámetro hará que el aire circule a velocidad menor y la temperatura se eleve, ya que se dispone de un mayor tiempo para elevarla. Por otro lado, si se aumenta

la potencia de la resistencia eléctrica ($PD_2$), la temperatura de salida aumentará y no tendrá ningún efecto en el caudal del aire del soldador.

La matriz de diseño es:

$$\begin{pmatrix} \text{Caudal de aire} \\ \text{Temperatura de salida de aire} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A11 & 0 \\ A21 & A22 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Diámetro del tubo de salida} \\ \text{Potencia de la resistencia eléctrica} \end{pmatrix}$$

La matriz anterior nos deja ver que el diseño es desacoplado. El diseño no es un mal diseño, pero puede ser mejorado convirtiendo el diseño desacoplado en un diseño no acoplado, y esto se puede lograr haciendo que $A_{21}$ sea cero.

Para lograr que $RF_2$ no sea afectado por $PD_1$ el soldador térmico debe de ser rediseñado, modificando la posición de la resistencia eléctrica y los orificios de respiración como se muestra en la Figura 4.7.

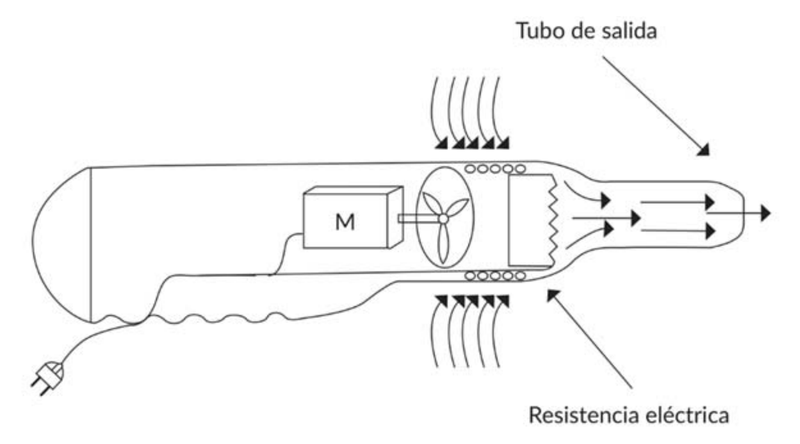



Figura 4.7. Soldador térmico de PVC, rediseñado. Fuente: Elaboración propia.

Con este rediseño el diámetro del tubo de salida tendrá una influencia despreciable sobre la temperatura alcanzada por la masa de aire generada por el ventilador, por lo que se puede decir que bajo este diseño el $PD_1$ no afectará el RF.

La matriz de diseño resultante es entonces:

$$\begin{pmatrix} \text{Caudal de aire} \\ \text{Temperatura de salida de aire} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A11 & 0 \\ A21 & A22 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Diámetro del tubo de salida} \\ \text{Potencia de la resistencia eléctrica} \end{pmatrix}$$

Por lo que el nuevo diseño del soldador térmico es un diseño no acoplado.

## DISEÑO ROBUSTO

Un producto o un proceso robusto es aquel que funciona correctamente aunque existan factores de distorsión. Algunos factores de distorsión son: variaciones en los parámetros, cambios ambientales, condiciones de funcionamiento, variaciones en la fabricación, etcétera.

El término 'diseño robusto' ha sido usado con diferentes significados por diferentes personas, sin embargo, fue popularizado por Genichi Taguchi como un método de la ingeniería de calidad a principios de los años 50. Taguchi considera tres etapas en el desarrollo de un producto o proceso:

- Diseño del sistema.
- Diseño de parámetros.
- Diseño de tolerancias.

En el diseño del sistema se emplean los conocimientos científicos y de ingeniería para determinar una configuración básica. Por ejemplo, suponiendo que se requiere fabricar un instrumento de medida de resistencias, para ello se puede emplear un 'puente de Wheatstone'.

El diseño de parámetros determina los valores específicos de los componentes del sistema. Se seleccionan las resistencias y la fuente de alimentación a emplear.

El diseño de tolerancias determina la tolerancia de los parámetros. Se determinan los componentes más sensibles que, por tanto, deben ser establecidos con un menor margen de tolerancias.

En esencia, el concepto de Taguchi de un diseño robusto es que, en vez de reducir las variaciones del proceso de producción (comprando mejor maquinaria, aumentando su mantenimiento, etcétera), hay que centrarse en la fase de diseño de un producto de manera que sea insensible a las fuentes de variabilidad, es decir, que sea robusto.

Generalmente, este enfoque para mejorar la calidad será considerablemente más económico. Además, buscará siempre sobrepasar las expectativas del cliente para dar importancia a aquellos parámetros que le interesen a este y ahorrarse dinero en otros que no le interesen.

En el contexto del DA, un diseño robusto es definido como aquel que satisface los RF aunque los PD y las VP tengan grandes tolerancias para la etapa de fabricación y ensamble. Esta definición de diseño robusto fue originalmente establecida para el diseño de producto y manufactura, pero es igualmente aplicable a sistemas, *software* y diseño organizacional.

## RESUMEN

En este capítulo se definió lo que un diseño unitario y un diseño múltiple representan dentro del enfoque axiomático. De igual forma, el concepto del pensamiento funcional fue presentado remarcando la importancia de utilizarlo durante el proceso de diseño con el fin de plantear las necesidades de los clientes en términos de los RF. El establecimiento de los mismos puede ser un proceso largo y requerir un gran esfuerzo, sin embargo, su importancia no debe ser exagerada.

Adicionalmente, se explicaron una serie de conceptos básicos de la metodología del DA desarrollada por Nap Suh. Entre ellos, qué es un dominio, necesidades del cliente, mapear, zigzaguear, jerarquías y descomposición, entre otros.

Posteriormente, respecto al concepto de axiomas y diseño unitario, se tiene lo siguiente: ya que en el diseño unitario el axioma de independencia, AI, es siempre satisfecho, los problemas de acoplamiento no existen. Por lo tanto, solo hay que esforzarse en satisfacer el axioma de información Ain, lo cual puede lograrse reduciendo al mínimo el contenido de información, o lo que es lo mismo, incrementando la probabilidad de que el único RF sea satisfecho.

A través de los diversos ejemplos presentados en este capítulo, se puede ver cómo un RF puede ser satisfecho a través de la selección un PD de manera cualitativa.

Respecto al diseño múltiple, se enfatizó la importancia de satisfacer el axioma de independencia (AI). A través de un ejemplo pudimos observar cómo un diseño múltiple puede ser rediseñado para lograr una total independencia de los RF, es decir, un diseño desacoplado puede ser convertido en un diseño no acoplado.

Finalmente, se desarrolló el concepto de diseño robusto, así como los pasos necesarios durante el proceso.

## REFERENCIAS

ALLBIS. Cajas y Empaques Nacionales, S. A. de C. V., Ecatepec. Cajón de Cartón. Recuperado de http://mexico-distr.all.biz/cajon-decartn-g33366#.WB9-ktLhAdU.

COCHRAN, D. S., y Reynal, V. A. (1996). *Axiomatic design of manufacturing systems* (RP96-05-14). Recuperado de Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

DDS media (2014). Tecnología, actualidad y *gadgets*. Ya a 31 años de que salió a la venta el primer celular de la historia. Recuperado de http://www.ddsmedia.net/blog/2014/03/ya-a-31-anos-de-que-salio-a-la- venta-el-primer-celular-de-la-historia/#.

ECALIDAD. Equipos de medida a tu alcance. Contador Manual Mecánico Mod. 00. Recuperado de: http://ecalidad.es/1-contadores-manuales/12-contador-manual-mecanico-mod-00.html.

HOUSHMAND, M., y Jamshidnezhad, B. (2002, June 10 & 11). *Conceptual design of lean production systems through an axiomatic approach.* Paper presented at the Proceedings of ICAD2002 Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA.

HOUSHMAND, M., y Jamshidnezhad, B. (2006). An extended model of design process of lean production systems by means of process variables. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22*(1), 1-16. doi: http:// doi.org/10.1016/j.rcim.2005.01.004.

LEDCONTROLS. Catálogo. Contador electrónico IVO NE210.012AXA. Recuperado de: http://www.ledcontrols.com.mx/ver.php?modelo=465.

MAYER Group (2015). 4 Benefits of using exact macola software for inventory. Recuperado de http://www.mayererp.com/mgblog/4-ben- efits-of-using-exact-macola-software-for-inventory.

SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

SUH, N. P. (2001). *Axiomatic design: advances and applications*: Oxford University.

# 5. DISEÑO AXIOMÁTICO EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS

## INTRODUCCIÓN

Tal y como se expuso en el primer capítulo, existen diversas formas de llevar a cabo el diseño de un producto, dependiendo de las características de este, la metodología para llegar a un producto comerciable podrá variar. Por un lado, se podrán fabricar artículos que solo requieran de una buena funcionalidad para cumplir con las necesidades de los usuarios/proceso, pero por otro lado pueden realizarse diseños cuyo atractivo principal esté basado en algún concepto estético. El éxito comercial de un producto no solo requiere del diseño ventajoso e innovador. Un análisis del mercado es requerido para considerar la oportunidad que se tiene en la producción, distribución y oferta del producto. Entre más grande sea el área de venta, mejor será la posibilidad de introducirlo. En la creación de nuevos productos se requiere una parte inventiva que compita con los diseños actuales o que abra la posibilidad de generar una necesidad inexistente, pero si los costos de inversión superan al número de compradores y su capacidad de adquisición, de nada servirán la buena calidad o la excelente funcionalidad del producto.

Debido a la competitividad en el mercado, las compañías manufactureras invierten gran parte de su capital en el desarrollo óptimo de sus diseños, ya que la mayor parte de los problemas en la calidad de los productos se debe a diseños incompletos o aquellos que no fueron propiamente desarrollados.

Los costos dedicados al desarrollo de nuevos productos pueden llegar a ser poco significantes en relación con el resto, aunque estos asciendan a varios millones de dólares. El análisis económico al invertir en un nuevo producto debe establecer con claridad la vida útil de este, así como una precisa determinación de los gastos durante el proceso de creación del producto a introducir. Este trabajo no es fácil de llevar a cabo ya que por lo regular se posee poca información y las decisiones de los expertos se pueden convertir en alto riesgo. Suh (2001) menciona que no vale la pena invertir en el desarrollo de un producto cuando su mercado a nivel mundial no supere los 10 millones de dólares por año; si el potencial del tamaño del mercado supera 1 billón de dólares, lo mejor sería aventurarse, aunque se tengan fuertes competidores.

Por lo general, en las instituciones educativas relacionadas con la enseñanza del diseño se instruye sobre los aspectos técnicos de los productos, dejando a un lado la posibilidad de comercializarlos. Un alumno llega a ser exitoso cuando logra que el objeto diseñado funcione de acuerdo con lo programado. Aunado a esto, no existe una definición clara del profesional que debe estar a cargo del desarrollo; la mayor parte de las ingenierías promueven el diseño de productos de acuerdo con su especialidad, pero el alumno no aprende a integrarse con otras áreas que le ayuden a lograr el producto en forma integral; esto resulta en problemas de comunicación cuando los egresados se integran a compañías que realizan diseños industriales. Existen productos que requieren del conocimiento en materiales, diseño electrónico y programación. Si el producto se termina en un área y luego se pasa a otra, es muy probable que el programador no entienda los requerimientos del ingeniero electrónico ni las necesidades de integrar un material resistente, lo que resulta en un producto que probablemente satisfaga los deseos de los diseñadores y no las necesidades del cliente. El diseño debe irse construyendo para cubrir los requerimientos con base en parámetros, tomando simultáneamente en cuenta todas las áreas involucradas en el proceso.

La selección del concepto es la parte más crítica del proceso del diseño, ya que determina la dirección de las siguientes etapas del diseño. Adicionalmente, resulta una tarea difícil porque la información disponible para la toma de decisiones en esta etapa es impredecible y subjetiva.

En cada etapa del diseño del producto se toman decisiones vitales, afectando el grado de éxito en el diseño final. Sin embargo, el impacto de las decisiones en la etapa conceptual del diseño es particularmente significante, debido a la influencia de las subsiguientes etapas en relación con el costo, la calidad y el desempeño del producto terminado (Wang, Shen, Xie, Neelamkavil, y Pardasani, 2002). Es difícil o casi imposible compensar o corregir las consecuencias de un diseño conceptual pobre desarrollado en las primeras etapas del proceso del diseño. Regularmente, se establece que entre el 60 y el 80 % del costo de todo el diseño del producto está comprometido en esta etapa, a pesar de que la fase del diseño conceptual cuesta solo el 3 % de los recursos para el desarrollo de productos (Duffy, Andreasen, Maccallum, y Reijers, 1993; Vollbracht, 1986).

En un artículo publicado por Goel y Singh (1998), se dice que la creatividad y la innovación son la llave para sobrevivir en un ambiente altamente competitivo. Los elementos básicos en el proceso creativo e innovador para poder obtener productos durables son: definir, buscar y evaluar.

- Definir: Entender la necesidad en un ambiente natural de solución. La necesidad debe llegar debido a: a) lo que el cliente quiere; b) innovaciones tecnológicas; c) competencia; y d) alto número de fallas. Estas necesidades están en el dominio del cliente y deben ser convertidas en los Requerimientos Funcionales. Para cada requerimiento funcional, se requiere definir un mínimo de durabilidad aceptable y una durabilidad ideal.
- Buscar: Crear un número de soluciones alternativas sin tomar prejuicios de estas. Las alternativas deben ser generadas usando técnicas.
- Evaluar: Aplicar un juicio y seleccionar los conceptos más robustos y más durables. El juicio requiere de una revisión de literatura en la que se deben incorporar normas/reglas/principios, mediciones objetivas y mediciones subjetivas.

En su artículo, Akay, Kulak, y Henson (2011), mencionan que la selección de las alternativas disponibles puede evitar tanto el error de no aceptar un diseño que debería ser aceptado (*go errors*), como errores en los cuales se deja un diseño que podría ser exitoso (*drop errors*). Un *go error* causa un concepto inferior de moverse dentro de los subsecuentes procesos del diseño y el *drop error* conduce a que una idea factible sea eliminada. Sin dejar a un lado la importancia de la evaluación del concepto, es una tarea difícil la de manejar la selección de alternativas, debido a que la etapa del diseño conceptual es solo un bosquejo austero o una idea existente del concepto, la información disponible es muy incompleta, vaga o imprecisa. Por lo tanto será difícil hacer una selección correcta. Como una consecuencia de la ausencia de información, la influencia de las decisiones en esta etapa programada de diseño es extremadamente alta (ver figura 5.1).

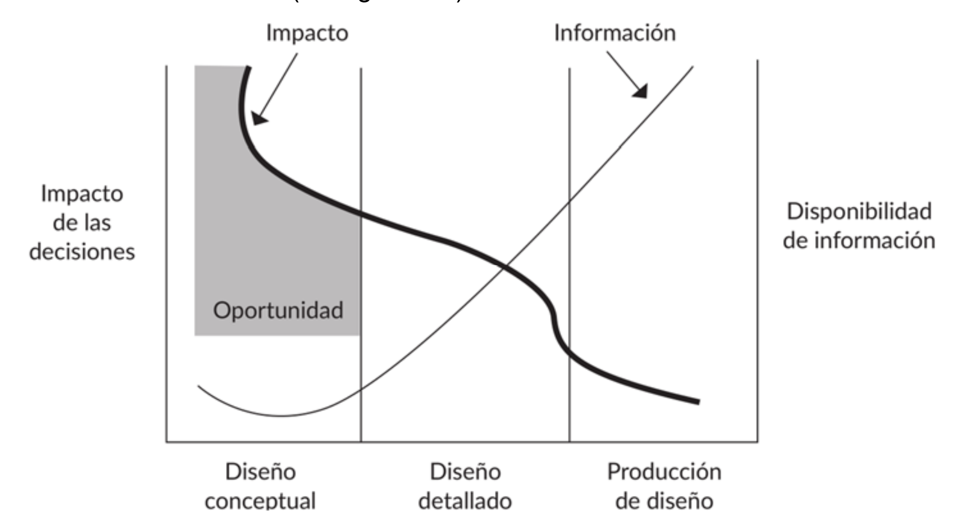



Figura 5.1. Oportunidad de diseño conceptual. Adaptada de Wang *et al.* (2002).

En la práctica diaria resulta difícil tanto llevar a cabo las etapas del desarrollo del producto como mantener una buena comunicación entre los integrantes encargados de la implementación de proyectos. El presente capítulo pretende dar a conocer la forma en que se puede hacer el análisis de productos industriales mediante el uso de DA. Para esto, se presentan varios ejemplos abordados desde una perspectiva del diseño de productos, utilizando requerimientos que representan necesidades comunes en la industria.

## EL DA EN EL DISEÑO DE UN TABLERO DE AUTOMÓVIL

Algunos estudios se han realizado en el ámbito de diseño para automóviles, en donde trabajos como el de Cebi y Kahraman (2010), se centran en el diseño de un panel de indicadores para vehículos de pasajeros sobre la base de los principios de DA. En este estudio, los principios axiomáticos de diseño propuestos por Suh se utilizan en un entorno difuso. Tanto el axioma de independencia como el axioma de la información se utilizan. El axioma de independencia se usa para los siguientes objetivos: 1) la obtención de un mapa de diseño; 2) determinar los Parámetros de Diseño y su importancia; y 3) el cálculo de la independencia funcional del diseño propuesto.

Entonces, el axioma información se utiliza para determinar el mejor diseño entre los que satisfagan el axioma de independencia y proponer las características de diseño adecuadas. Además, la importancia de los requisitos funcionales para el diseño del panel indicador se determina mediante el proceso de jerarquía analítica en el estudio presentado.

Los RF y sus PD son presentados en la figura 5.2 como un gráfico que resume la información determinada para el estudio. En la figura 5.3 se puede observar el conjunto de diseños obtenidos, de los cuales se eligió el $A_1$ como el mejor del panel, de acuerdo con el peso de los indicadores de información, mientras que los diseños $A_8$, $A_{19}$ y $A_{16}$ son los peores respecto a los requerimientos $RF_{21}$, $RF_{22}$, $RF_{23}$ y $RF_{24}$.

- $PD_1$: Ubicación del panel de indicadores
- $PD_2$: Indicador de diseño

Mapeo del diseño de panel de indicadores con diseño de interior de automóvil.

- $RF_{11}$: Prevenir panel de indicadores de los reflejos.
- $RF_{12}$: Eliminar todos los obstáculos que dificultan la visibilidad de los indicadores del panel.

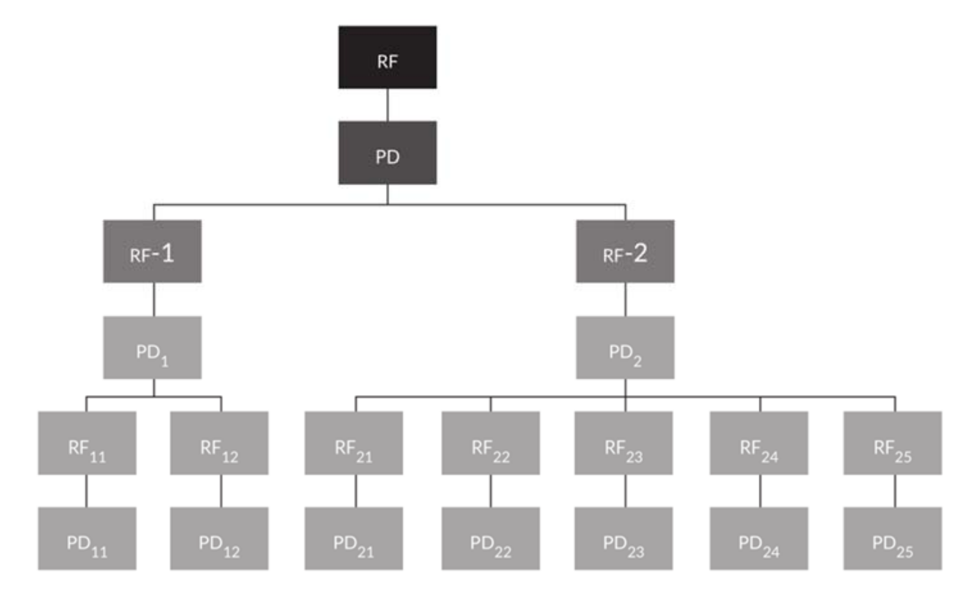



Figura 5.2. Descomposición de los RF y PD. Cebi y Kahraman, 2010.

- $PD_{11}$: Coloque el panel de indicadores en el tablero.
- $PD_{12}$: Diseño del volante de dirección.
- $RF_{21}$: Proveer deducción.
- $RF_{22}$: Proporcionar discriminabilidad.
- $RF_{23}$: Proporcionar compatibilidad.
- $RF_{24}$: Proporcionar significado.
- $RF_{25}$: Proveer estandarización.
- $PD_{21}$: Determinar el número efectivo y la secuencia de indicadores situados en el panel.
- $PD_{22}$: Usar diferentes colores para el fondo del panel indicador, la aguja y los números.
- $PD_{23}$: Proporcionar armonía entre los indicadores ubicados en el panel.
- $PD_{24}$: Hacer formas y figuras utilizadas en el panel de indicadores que sean diseñadas comprensiblemente.
- $PD_{25}$: Utilizar estándares de códigos, figuras y formas para el panel de diseño.

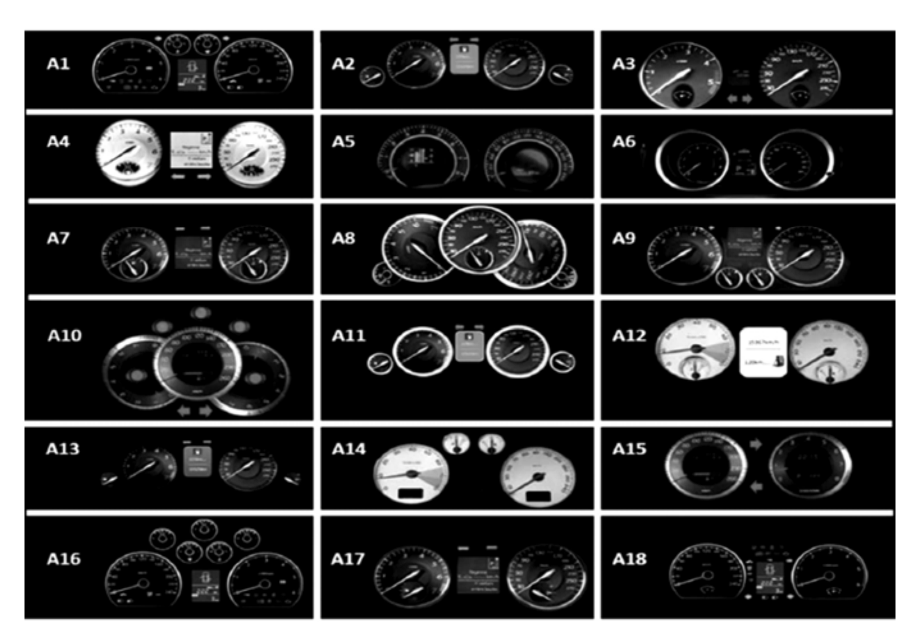



Figura 5.3. Prototipos considerados en el proyecto. Cebi y Kahraman, 2010.

## EL DA EN EL DISEÑO DE UN REFRIGERADOR

Como una forma de entender el diseño axiomático con la aplicación de modelos didácticos, Suh (2001) presenta la propuesta para analizar el diseño de una puerta para refrigerador, la cual debe cubrir en un principio dos necesidades importantes:

- $RF_1$: Proporcionar un fácil acceso a los artículos dentro del refrigerador
- $RF_2$: Disminuir le pérdida de energía

Tomando en cuenta estos RF, se determinan los parámetros que cubrirán la forma de dar respuesta a los requerimientos anteriores:

Los PD se eligen como:

- $PD_1$: Puerta en forma vertical
- $PD_2$: Material de aislamiento térmico para la puerta

La matriz de diseño debe iniciarse como:

$$\begin{Bmatrix} RF1 \\ RF2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1 \\ PD2 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.1

En donde la forma de la puerta tiene que ver con proporcionar fácil acceso y disminuir la pérdida de energía, mientras que el material de aislamiento no tiene que ver con proporcionar un fácil acceso pero sí con disminuir la pérdida de energía.

El diseño de la puerta es un diseño desacoplado. Desafortunadamente, todavía no es un buen diseño porque el aislamiento térmico (normalmente de espuma de poliuretano) no puede ser puesto en la puerta para compensar el aire frío que se escapa del refrigerador al abrirse la puerta.

Una solución es hacer la puerta como en los congeladores horizontales. En este caso el aire frío estará dentro del refrigerador al abrirse la puerta y se mantendría independencia respecto al $RF_2$. La matriz de diseño quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} RF1 \\ RF2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1 \\ PD2 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.2

Si se toma en cuenta que hoy en día los consumidores demandan un aparato eléctrico donde puedan preservar sus alimentos por mucho más tiempo, lo típico es congelar los alimentos para conservarlos un largo plazo y un poco de comida a una temperatura fría sin congelar para conservar a corto plazo. Estas necesidades en términos formales pueden ser dos RF:

- $RF_1$: congelar la comida para preservarla por largo tiempo
- $RF_2$: mantener los alimentos a baja temperatura para preservarlos por corto tiempo

Para satisfacer estos dos RF, el diseño del refrigerador tendrá dos compartimientos. Los PD de este refrigerador se expresan así:

- $PD_1$: La sección del congelador.
- $PD_2$: La sección enfriadora.

Para satisfacer los RF, el congelador solo debe congelar la comida de su sección y el enfriador solo controlar lo de su sección. De esta manera, la matriz de diseño será diagonal. Cuando se descomponen estos RF y PD, se tiene que asegurar que ambos de la sección de abajo son compatibles con los cambios de la sección de arriba.

Al elegir el $PD_1$, se puede descomponer el $RF_1$ como:

- RF11: control de temperatura en el congelador de -18ºC ± 2ºC.
- RF12: mantener la temperatura preestablecida uniformemente en todo el congelador.
- RF13: controlar la humedad relativa a un 50% en la sección del congelador.

De manera similar, basado en la opción $PD_2$ hecha, $RF_2$ puede ser descompuesto como:

- $RF_{21}$: control de temperatura en el enfriador de 2ºC a 3ºC.
- $RF_{22}$: mantener la temperatura preestablecida uniformemente en todo el enfriador con variación entre los 0.5ºC.

Para cumplir con el segundo nivel de RF, se debe imaginar un diseño e identificar PD que puedan satisfacer los RF en este nivel de descomposición. Así como los $RF_1$ y $RF_2$ serán independientes uno de otro a través de la elección de los $PD_1$ y $PD_2$ adecuados, ahora se tendrá que garantizar que los RF en este segundo nivel son independientes uno de otro. Además, los PD del nivel inferior deben ser compatibles con la matriz de diseño de nivel superior y no comprometer la independencia de $RF_1$ y $RF_2$.

Los requerimientos del congelador pueden satisfacer:

- Bombeo de aire frío en el congelador.
- Circulación uniforme de aire frío por todo el congelador.
- Monitorear la temperatura y humedad del aire de retorno de manera que la temperatura sea controlada en forma independiente del contenido de humedad del aire.

A continuación los PD de segundo nivel que pueden ser elegidos como:

- $PD_{11}$: Sensor/sistema que arranca el compresor (apagado) cuando la temperatura del aire es mayor (menor) que la temperatura en el congelador.
- $PD_{12}$: Sistema de circulación de aire que sopla uniformemente aire frío por todo el congelador en todo momento.
- $PD_{13}$: un condensador que actúe con la humedad en el aire, haciendo que se devuelva a su punto de rocío cuando se exceda.

De esta manera, la ecuación de diseño se puede escribir así:

$$\begin{Bmatrix} RF12 \\ RF11 \\ RF13 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD12 \\ PD11 \\ PD13 \end{Bmatrix} \qquad \text{Ecuación 5.3}$$

Esta ecuación muestra que el diseño es desacoplado. Sin embargo, debe tener en cuenta que se debieron modificar los RF y PD para convertirlos en una matriz triangular. Es decir, el ventilador debe ser encendido primero (o simultáneamente) antes de encender el compresor. Ahora se puede diseñar la sección enfriadora en donde la comida tiene que ser mantenida en el intervalo de 2ºC y 3ºC. Aquí, nuevamente, puede circular el aire refrigerado a través de la sección de enfriamiento y regresar al compresor cuando la temperatura del aire devuelto está fuera de la gama preestablecida. Para tener una distribución uniforme de la temperatura, se debe diseñar una combinación de ventilación para asegurar una buena circulación de aire de la sección enfriadora. Los Parámetros de Diseño son:

- $PD_{21}$: Sensor/sistema que arranca el compresor (apagado) cuando la temperatura del aire es mayor (menor) que la temperatura en el enfriador.
- $PD_{22}$: Sistema de circulación de aire que sopla uniformemente aire frío por todo en enfriador en todo momento.

El diseño de la matriz de {$RF_{21}$, $RF_{22}$} – {$PD_{21}$, $PD_{22}$} tiene relación triangular, como se muestra a continuación:

$$\begin{Bmatrix} RF22 \\ RF21 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD22 \\ PD21 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.4

Esta matriz maestra muestra que la descomposición es consistente con el diseño original. Una de las preguntas diseñadas para contestar aquí es si el mismo compresor y el mismo ventilador pueden ser usados para satisfacer los conjuntos {$RF_{11}$, $RF_{12}$, $RF_3$} y {$RF_{21}$, $RF_{22}$} para minimizar la información contenida sin comprometer su independencia. Claramente, se puede usar un compresor y dos ventiladores para satisfacer el diseño mostrado arriba. $PD_{11}$ y $PD_{21}$ son sistemas de sensor/compresor; así, el compresor va a estar encendido cuando cualquiera de estos dos sensores esté prendido. Pero el abanico (representado por $PD_{12}$ y $PD_{22}$) no va a estar prendido a menos que la temperatura de su respectiva sección vaya más allá de su alcance. Este hecho puede ser claramente representado si se descompone $RF_{11}$-$PD_{11}$ y $RF_{21}$-$PD_{21}$ hacia el siguiente nivel.

El diseño con dos ventiladores y un compresor satisface los RF especificados y la regla de la independencia axiomática, y el diseño puede terminar comprometiendo los RF, eliminando algunos de ellos o dándoles un alcance más grande para la temperatura, control de humedad, etcétera, para satisfacer la independencia axiomática.

## EL DA EN EL DISEÑO DE UN NUEVO DVD

Cha y Cho (1999), realizaron una evaluación de un reproductor de DVD usando el método de DA para utilizar sus ventajas en un nuevo diseño de la funcionalidad del dispositivo. El diseño del dispositivo DVD actualmente manufacturado ha sido evaluado, y los resultados de la evaluación han sido expresados cuantitativamente como una matriz de diseño. Los problemas encontrados se pueden resumir como sigue:

- La velocidad de rotación del disco debe ser incrementada para mejorar la velocidad de trasmisión de datos del DVD, y para poder llevar a cabo esto se debe lograr una estabilidad en la velocidad de rotación; la velocidad de respuesta debe ser mejorada, también. Pero, debido a la inestabilidad del momento angular de inercia y vibración, se siguen teniendo problemas.
- Los errores ocurridos de vibración deben ser prevenidos para estabilizar la operación del DVD en alta velocidad de entrada/salida de datos. Pero el diseño antivibración del DVD actual intenta absorber tanto el impacto externo como la vibración interna del disco con solo un amortiguador. El diseño actual de DVD requiere un incremento de la velocidad de rotación del disco, de otra forma, los problemas de vibración del DVD seguirán sin resolverse en el diseño. Aparte de los problemas mencionados anteriormente, existen algunos puntos para trabajar en la mejora del desempeño del DVD. Estos puntos de-ben ser evaluados y mejorados con el método axiomático.

El primer paso en la aplicación del método axiomático es adquirir información sobre los requisitos de los clientes. Estos deben entenderse a fondo con la finalidad de establecer el sentido de aplicación de los requerimientos de los clientes. Los atributos del cliente son:

- $AC_1$: Velocidad alta de entrada/salida es requerida.
- $AC_2$: El DVD no debe ser afectado por los impactos de vibración.
- $AC_3$: Se requiere estabilidad en la operación.

El segundo paso es aplicar el método axiomático para establecer los RF basados en los requerimientos del cliente y en el conocimiento del tema. En este caso, los RF son establecidos por medio del objetivo de investigación. Los RF para el primer requerimiento del cliente son los siguientes:

- $RF_1$: Velocidad alta de rotación.

- $RF_{11}$: Estabilidad en la velocidad. Asumiendo que el peso del disco no cambia, es la estabilidad de la velocidad de rotación la principalmente afectada por las propiedades dinámicas del motor de giro y por las turbulencias externas. Las turbulencias incluyen el impacto externo, excentricidad del disco y vibración de rodamiento del motor.
- $RF_{12}$: Rápida respuesta en velocidad. La velocidad de respuesta es el requerimiento de qué tan pronto la velocidad de rotación alcanza el valor deseado cuando el cambio de velocidad es requerido por la velocidad inicial o por el rastreo, de acuerdo con la localización radial.

El dispositivo DVD tiene una gran capacidad de almacenamiento por medio de la aplicación de la tecnología de alta densidad. Para los requerimientos jerárquicos funcionales de alta velocidad, se determinaron los PD con los que cuenta el diseño actual y se relacionan con los requerimientos anteriores.

- $PD_1$: Motor de giro.
- $PD_{11}$: Control de la velocidad rotacional del motor de giro. Principalmente afecta la estabilidad de la velocidad y la respuesta de la velocidad.
- $PD_{12}$: Control del momento rotacional del disco. Afecta en gran medida la respuesta de velocidad.

Las relaciones entre los RF y los PD pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} RF11 \\ RF12 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & x \\ x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11 \\ PD12 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.5

Esta matriz muestra que los elementos están acoplados. Esto significa que el control de la velocidad de rotación del motor y el control del momento rotacional del disco son afectados por la estabilidad en velocidad alta y la mejora en la velocidad de respuesta. Los requerimientos mencionados deben mantenerse independientes por medio de la adopción de un nuevo diseño, debido a que el presente no puede ser mejorado.

Los RF del segundo requerimiento del cliente son:

- $RF_2$: La antivibración debe ser eficiente.
- $RF_{21}$: Debe ser durable al impacto externo. El dispositivo DVD a ser diseñado será usado en la computadora. Hay una pequeña posibilidad de que un impacto externo ocurra en la computadora, pero una vez que suceda, tendrá una mayor energía que la vibración interna, lo cual es una razón para ser considerado.
- $RF_{22}$: Debe absorber la vibración interna. La fuente para la absorción de la vibración interna del dispositivo DVD es la rotación del disco excéntrico. Esta vibración interna afecta en gran medida los datos de entrada/salida. Servirá eficientemente para tener una operación estable.
- Aún bajo condiciones ideales, normalmente la operación de los aparatos puede resultar en mal funcionamiento debido a la turbulencia externa o a vibración interna. También la vibración continua puede afectar mucho la vida útil del aparato. Entonces, el aparato debe ser diseñado para operar normalmente aun con el impacto externo bajo un nivel definido y tolerar la vibración interna del disco excéntrico.

Los PD para los RF del segundo requerimiento del cliente son los siguientes:

- $PD_2$: Amortiguador de vibración.

- $PD_{21}$: Características del material de absorción de la vibración del amortiguador. Es la característica del material del amortiguador de la absorción, el cual afecta la trasmisión de la vibración.
- $PD_{22}$: Localización y forma del amortiguador de vibración. Son la localización y forma del amortiguador las que afectan la ruta y dirección de la vibración.

Las relaciones entre los RF y los PD pueden expresarse en la siguiente matriz:

$$\begin{Bmatrix} RF21 \\ RF22 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & x \\ x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD21 \\ PD22 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.6

La matriz anterior muestra un diseño acoplado. Esto es porque el amortiguador ha sido usado para satisfacer los dos requerimientos, lo cual resulta en un efecto mutuo. Para resolver este problema, un nuevo diseño de DVD deberá ser proveído.

Para el tercer requerimiento del cliente se determinaron los siguientes RF:

- $RF_3$: Estabilidad del plato.
- $RF_{31}$: Minimización de la vibración durante la entrada/salida. El plato debe estar controlado para moverse suavemente. El movimiento del disco y la vibración del plato están relacionadas con las rayaduras en los discos.
- $RF_{32}$: Precisión de la ruta de operación del plato. Durante el movimiento inicial del plato siempre hay alguna vibración, pero si esta es excesiva se vuelve difícil controlar con precisión la localización del disco.
- $RF_{33}$: Precisión de la localización del plato. Si el plato no localiza el disco en forma precisa, dificulta irse al siguiente paso.

Los siguientes PD fueron seleccionados de acuerdo con los Requerimientos Funcionales mencionados anteriormente:

- $PD_3$: Plato
- $PD_{31}$: Momento de inercia del disco. El factor más importante que afecta la suavidad de operación del plato es el control del motor sin instalaciones adicionales, como lo es un amortiguador, el impacto durante el movimiento solo puede ser controlado por la velocidad de rotación.
- $PD_{32}$: Búsqueda de precisión del plato. La ruta de operación del plato depende de su precisión de búsqueda. Aunque el tipo de dientes en el engrane tiene alguna relación, la forma de búsqueda es un factor que afecta únicamente la ruta de operación.
- $PD_{33}$: Manufactura del plato. La localización del disco para más de uno depende de la forma que tiene la parte localizadora del disco, la cual está relacionada con la precisión de su manufactura.

La relación entre los RF y los PD están expresados en la siguiente matriz:

$$\begin{Bmatrix} RF31 \\ RF32 \\ RF33 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & x & o \\ o & x & o \\ o & x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD31 \\ PD32 \\ PD33 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.7

La matriz anterior es un diseño acoplado, pero puede ser desacoplado reacomodando el orden de los RF respecto a sus correspondientes PD de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} RF32 \\ RF31 \\ RF33 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & o & o \\ x & x & o \\ x & o & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD32 \\ PD31 \\ PD33 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.8

Es necesario seleccionar los PD en dirección a mejorar los RF en relación con los PD. La anterior matriz desacoplada puede indicar un diseño aceptable y por lo tanto este requerimiento no será considerado a modificar en el nuevo diseño del DVD.

## Desarrollo del nuevo DVD

El sistema operativo del DVD actual, que se muestra en la figura 5.4, ha llegado a un punto muerto con los problemas de ruido y vibraciones. La opinión general es que estos problemas no se pueden superar sin una nueva fuente óptica o de funcionamiento mecánico. Mientras tanto, para el sistema de disco óptico de la próxima generación, la capacidad de almacenamiento de información debe ir en aumento para procesar datos multimedia.

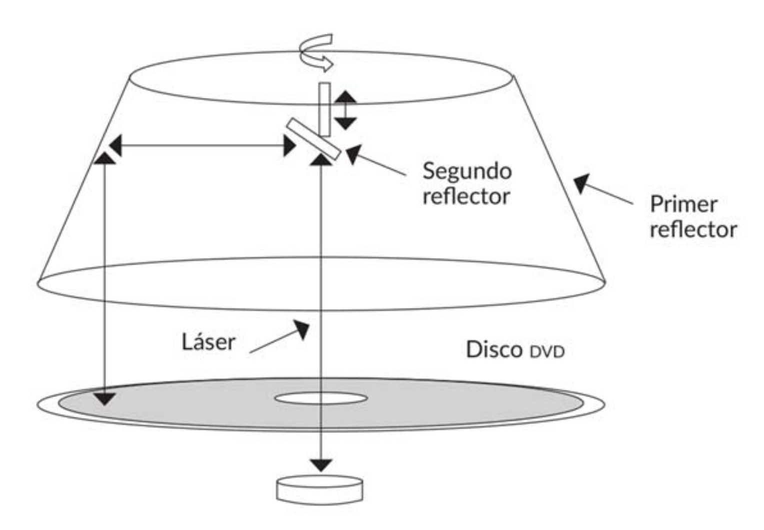



Figura 5.4. El modelo de la nueva propuesta de DVD. Cha y Cho, 1999.

El propósito es evaluar el nuevo DVD, estructurar en detalle y resolver los problemas que podrían ocurrir utilizando la matriz de diseño. Los Requerimientos Funcionales están relacionados con el funcionamiento de estabilidad.

- $RF_{11}$: La velocidad lineal constante debe ser mantenida. El DVD utiliza velocidad lineal constante con el mecanismo de control de la rotación. Debido a que el nuevo DVD gira el primer reflector para regular la velocidad de rotación, la velocidad de rotación del segundo reflector debe ser controlada con precisión.
- $RF_{12}$: El disco debe ser seguido con precisión. Mientras que el control de la corriente del DVD de la parte de selección funciona con un servo de seguimiento, el nuevo DVD rastrea el disco moviendo el segundo reflector arriba y hacia abajo.
- $RF_{13}$: El cuerpo principal del segundo reflector debe ser accesado en alta velocidad para minimizar el tiempo de carga después de que el disco está colocado.
- $RF_{14}$: La vibración causada por la rotación a alta velocidad debe ser minimizada. En el caso del segundo reflector, esta última es una de las principales causas de la vibración interna. Es imprescindible una mayor precisión en el control y absorción de vibraciones para minimizar la posibilidad de error.

Los PD relacionados con los anteriores RF son seleccionados como sigue:

- $PD_{11}$: Control de motor de giro que permite continuos cambios en la velocidad de rotación. El control del cabezal del motor es un factor muy importante debido a que el nuevo DVD tendrá una velocidad lineal alta.
- $PD_{12}$: Control del servo de seguimiento. El área de una pista es de 0.74 VIU, al cual el segundo reflector busca mientras se mueve arriba y abajo.
- $PD_{13}$: Control del servo de movimiento del reflector. El DVD actual gira el disco después de que se ha cargado en el motor del cabezal. En el nuevo DVD, el disco está fijo, mientras que el segundo reflector gira en alta velocidad, por lo tanto, el proceso de fijación del disco y la rotación del segundo reflector se puede hacer simultáneamente para reducir la carga tiempo. En consecuencia, el único factor útil para la mejora es el tiempo de acceso.
- $PD_{14}$: Parte antivibratoria del reflector. Debido a que los datos en DVD se almacenan en alta densidad, es muy importante reducir al mínimo la vibración mecánica causada por la rotación del segundo reflector. La forma y posición de la parte antivibración deben estar diseñadas para aislar la vibración externa y minimizar en el interior la vibración del segundo reflector.

Las relaciones entre los RF y asociaciones del desarrollo se expresan como sigue:

$$\begin{Bmatrix} RF11 \\ RF12 \\ RF13 \\ RF14 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & o & o & o \\ o & x & o & o \\ o & x & x & o \\ o & o & o & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11 \\ PD12 \\ PD13 \\ PD14 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.9

La matriz anterior es desacoplada, por lo tanto, es posible diseñar el DVD cuando los PD se seleccionan con la anterior secuencia, las cuales no afectarán los RF.

La propuesta para el segundo requerimiento sería la siguiente:

- $RF_{21}$: La rugosidad de la superficie del espejo debe ser minimizada. Con el tratamiento preciso de la superficie, el error de la ruta óptica puede ser reducido. Cuanto menor sea la rugosidad de la superficie en comparación con el tamaño del haz, menor es el error que se producirá.
- $RF_{22}$: Tener reflexión total en la parte superior del espejo y sin reflexión sobre la parte inferior del espejo. Con el tratamiento preciso de la superficie, el error de la ruta óptica puede ser reducido. Cuanto menor sea la superficie rugosa en comparación con el tamaño del haz, menor es el error que se producirá.
- $RF_{23}$: La vibración del espejo debe ser minimizado. No importa qué tan preciso es el camino óptico, el camino será alterado en el caso de cualquier vibración. La vibración en piezas que tienen contacto por lo general afecta a todo el sistema. Por lo tanto, es importante reducir al mínimo la vibración del espejo a la hora de diseñar el mecanismo de esta parte.

Los Parámetros de Diseño relacionados con los Requerimientos Funcionales se seleccionan como sigue:

- $PD_{21}$: Tratamiento de la superficie del espejo reflectante. Hay tecnología de tratamiento superficial disponible para el grado nano hasta el momento. Un pequeño cambio en el ángulo óptico puede cambiar el destino final de la trayectoria óptica, por lo tanto, el error angular debe ser considerado cuando la fuente óptica es reflejada.
- $PD_{22}$: Recubrimiento de la superficie del espejo reflectante. No debe haber reflexión sobre la parte inferior del espejo y la reflexión debe ser total sobre la parte superior y hacia la fuente óptica, con el fin de que llegue a la superficie del disco sin ninguna pérdida y entonces vuelva a la parte recolectora nuevamente para la lectura y escritura.

- $PD_{23}$: La fijación del espejo reflectante. La vibración afecta el espejo y altera la trayectoria óptica, dando lugar a errores. El mecanismo debe estar diseñado para minimizar las vibraciones que se producen a partir de las piezas de conexión del espejo. Para que esto sea realizado, la absorción de la vibración debe ser maximizada en la parte inferior del espejo.

Al repasar los RF y los PD, se observa que la rugosidad de la superficie se ve afectada únicamente por el tratamiento de la superficie. También se advierte que el revestimiento de la superficie no está relacionado con la fijación de las piezas de conexión.

$$\begin{Bmatrix} RF21 \\ RF22 \\ RF23 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x & o & o \\ o & x & o \\ o & o & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD21 \\ PD22 \\ PD23 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 5.10

Como la matriz de arriba es un diseño funcional no acoplado, entonces la independencia se mantendrá.

Dado que el nuevo diseño consigue dos matrices desacopladas y una matriz no acoplada, se concluye que es viable su diseño. La evaluación del diseño de los productos existentes es esencial para mejorar la función de rendimiento del producto. Los problemas del diseño actual de DVD han sido cuantitativamente proporcionados a los fabricantes para revisarlos por medio de la aplicación del enfoque axiomático.

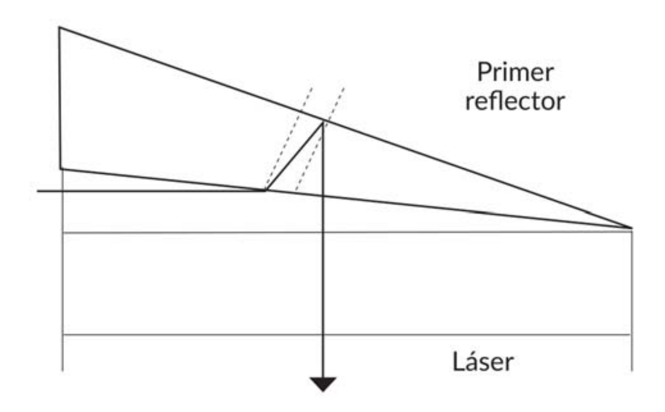



Figura 5.5. El modelo del primer reflector. Cha y Cho, 1999.

Diversos mecanismos son necesarios para satisfacer los Requerimientos Funcionales del nuevo DVD. El modelo de la nueva propuesta de DVD es la figura 5.4. Esta muestra el mecanismo de funcionamiento del nuevo modelo DVD. Es un mecanismo de rotación totalmente diferente comparado con el actual diseño de DVD. Para eliminar todo el ruido y las vibraciones del DVD, el disco es modificado y dos reflectores se utilizan para acceder al disco. Al girar el segundo reflector con un diámetro pequeño, se resuelven los problemas de ruido y vibraciones que se producen en la rotación del disco con diámetro grande. Adicionalmente, puesto que el segundo reflector no solo puede girar sino también moverse hacia arriba y abajo, se puede colocar a cada lugar del disco para leer o escribir datos sin mover la fuente óptica. Por otro lado, como el primer reflector debe ser diseñado para ocupar un espacio mínimo, el ángulo debe ser modificado. Por lo tanto, debe estar diseñado para tener una superficie inclinada y utilizar la difracción de la luz.

## RESUMEN

En el presente capítulo se revisó la importancia que tiene el mercado en el desarrollo de un producto desde las etapas iniciales. Se presentó información para entender que la innovación y la creatividad son los aspectos que hacen diferencia cuando se proyecta un producto. Asimismo, se utilizó el axioma de independencia mediante la aplicación práctica para el desarrollo de los mejores conceptos por medio del cumplimiento de los requerimientos establecidos.

## REFERENCIAS

AKAY, D., Kulak, O., y Henson, B. (2011). Conceptual design evaluation using interval type-2 fuzzy information axiom. *Computers in Industry, 62*(2), 138-146. doi: http:/doi.org/10.1016/j.compind.2010.10.007.

CEBI, S., y Kahraman, C. (2010). Indicator design for passenger car using fuzzy axiomatic design principles. *Expert Systems with Applications, 37*(9), 6470-6481. doi: http://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.138.

CHA, S. W., y Cho, K. K. (1999). Development of DVD for the next generation by axiomatic approach. *CIRP Annals Manufacturing Technology, 48*(1), 85-88. doi: http:/doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63137-0.

DUFFY, A. H. B., Andreasen, M. M., Maccallum, K. J., y Reijers, L. N. (1993). Design coordination for concurrent engineering. *Journal of engineering Design, 4*(4), 251-265. doi: http://doi.org/10.1080/09544829308914785.

GOEL, Parveen; Sing, Nanua. Creativity and innovation in durable product development. *Computers & Industrial Engineering*. 1998, vol 35.

SUH, N. P. (2001). *Axiomatic design: advances and applications*. Oxford University Press.

VOLLBRACHT, G. R. (1986). *The time for CAEDM is now.* Paper presented at the Proceedings of the Fourth National Conference on University Programs in Computer-Aided Engineering, Design and Manufacturing, Purdue University.

WANG, L., Shen, W., Xie, H., Neelamkavil, J., y Pardasani, A. (2002). Collaborative conceptual design– state of the art and future trends. *Computer-Aided Design, 34*(13), 981-996.

# 6. DISEÑO AXIOMÁTICO EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

## ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE MANUFACTURA?

Como punto de partida, es preciso clarificar el término 'manufactura'; esta se define como la aplicación de procesos mecánicos, físicos y químicos para modificar la geometría, las propiedades o la apariencia de cierta materia prima, de tal forma que se obtenga un producto nuevo o partes terminadas (Rao, 2007). La habilidad para realizar esta conversión eficientemente implica el diseño, uso e implementación de sistemas y procesos de manufactura, y determina el éxito una empresa. De esta manera, algunas definiciones de sistema de manufactura se presentan a continuación para su comparación y discusión. De acuerdo con Suh (1997; 1995), un sistema de manufactura es un subconjunto de sistemas de ingeniería en general y, por lo tanto, se han desarrollado y aplicado metodologías para el diseño de los mismos que aplican de manera general para todos. Más adelante Suh, Cochran y Lima (1998), agregan que se trata de un subconjunto de una empresa manufacturera completa. Similarmente, para Cochran y Lima (1998) se trata de un subconjunto de un sistema de producción. Chryssolouris (1992), Wu (1992) y Cochran (1994) lo definen como la disposición y operación de máquinas, herramientas, materiales e información para producir un producto o servicio con un valor agregado físico e informacional; su éxito y costo puede caracterizarse mediante parámetros ponderables.

En las definiciones anteriores, es posible identificar algunas similitudes y diferencias que se explican a continuación. En todas ellas, el enfoque sistémico está presente y coinciden en que un sistema de manufactura constituye un subconjunto de un sistema mayor llamado empresa o sistema de producción. Aunque no todas las definiciones detallan su propósito, se reconoce que implica originar un producto o servicio agregando un valor físico o de información. En la eficiencia con que se consiga este propósito estriba el éxito de cualquier compañía, por lo cual el estudio y perfeccionamiento de los sistemas de manufactura son de interés para los investigadores y empresarios en todo el mundo. Teorías y metodologías como el DA han contribuido al diseño de sistemas de manufactura, y este capítulo abordará su aplicación mediante la presentación de las principales aportaciones de dicha teoría a este campo del conocimiento.

## ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MANUFACTURA

Al considerar la concepción de un sistema de manufactura, desde el enfoque de Suh *et al.* (1998), como un subconjunto de una empresa de manufactura, se observa que en esta los sistemas constan de personas, cosas e información. Las personas se organizan para desempeñar funciones variadas en mercadotecnia, diseño, compras, control de inventarios, inspección, maquinado, administración, servicio, salud y seguridad, entre otras. Acerca del elemento que se refiere a cosas, puede decirse que se trata de la fábrica misma, máquinas, materiales, equipo de transporte y envío, equipo de cómputo, almacenes, proveedores de componentes y otros materiales. En lo que se refiere a la información, este elemento incluye los requerimientos de mercadotecnia, diseño del producto, sistemas de manufactura y operaciones, procesos de manufactura, recursos humanos, sistemas de cadena de suministros, y administración en general. Cochran y Lima (1998) coinciden en que el sistema de manufactura consta de máquinas, herramientas, material, personas e información. Todos estos elementos constituyen una empresa de manufactura y, por lo tanto, su diseño se considera un problema complejo.

De acuerdo con Suh *et al*. (1998), la combinación específica de los elementos de un sistema de manufactura está determinada por los RF establecidos para tal sistema. Es decir, la disposición de estos elementos depende fundamentalmente del propósito de la tarea para la cual el sistema ha sido creado. Cuando la tarea es maquinar partes de acuerdo a cierta demanda, por ejemplo, el sistema de manufactura consistiría en un conjunto de máquinas y herramientas flexibles en un taller. Ahora, cuando la tarea es producir millones de partes idénticas, el sistema consistiría en un grupo de máquinas especializadas (líneas de transferencia, por ejemplo). Cuando el propósito es producir juegos de partes en grandes cantidades, el mejor sistema de manufactura puede ser un tipo de línea de flujo celular. Cuando la tarea es construir un limitado número de productos de gran tamaño como, por ejemplo, máquinas variadas para la manufactura de vehículos enormes de alto caballaje, el sistema de manufactura puede ser un sitio estacionario o de lento movimiento en el cual las piezas se arman de acuerdo con cierta secuencia. Cuando la tarea es producir por ejemplo una variedad de partes por inyección de plástico en forma tridimensional, el sistema de manufactura consta de numerosas máquinas de inyección moldeadoras de plástico, equipadas para almacenamiento y traslado de las partes. Otro caso puede ser la fabricación de semiconductores para circuitos integrados, en el cual el sistema de manufactura consiste en una serie de máquinas fijas o flexibles instaladas bajo un ambiente completamente limpio y controlado. La tabla 6.1 resume estas recomendaciones.

Tabla 6.1. Propósito de la tarea y sistema de manufactura recomendado.

| **Propósito de la tarea a realizar** | **Tipo de sistema de manufactura** |
|---|---|
| Maquinado de partes bajo demanda | Taller de máquinas flexibles y herramientas |
| Producción de altos volúmenes (millones) de partes idénticas | Líneas de Transferencia con máquinas especializadas |
| Producción de grandes cantidades de juegos de partes | Sistema de manufactura de flujo celular |
| Producción de limitado número de productos de gran tamaño | Sistema estacionario o de movimiento lento |
| Producción de variedad de partes por inyección de plástico | Sistema de manufactura por proceso y almacenamiento y traslado de partes |
| Producción de semiconductores para circuitos integrados y electrocomponentes | Sistema de manufactura en serie con máquinas fijas o flexibles en ambiente controlado |

De esta manera, surge también la clasificación de los sistemas de manufactura, generalmente de acuerdo con la distribución física de las máquinas. En el caso del taller de máquinas, estas se distribuyen por funciones o procesos. Por ejemplo, departamento de fresado, torneado, etcétera. En el caso de líneas de transferencia, tecnología de grupos y manufactura esbelta, se utiliza el sistema de manufactura celular, en el cual la distribución de las máquinas se determina de acuerdo con el flujo de proceso del producto (Black, 1991; Cochran, 1994; Ham, Hitomi, y Yoshida, 1985). En nuestros días, esta distribución es típicamente utilizada, sin embargo, el mejor sistema de manufactura fija sigue siendo la línea de transferencia.

Otro aspecto de los sistemas de manufactura es el costo. De acuerdo con Suh *et al*. (1998), este puede variar de acuerdo con el volumen de producción, el grado de automatización, el costo de mano de obra, el costo del equipo y la ubicación geográfica. Para mantener la competitividad, los sistemas de manufactura deben tener una capacidad mayor a cierto tamaño mínimo de producción que les permita procesar un mínimo número de partes a un precio competitivo.

## EL DISEÑO DE SISTEMAS DE MANUFACTURA

Como antecedentes de este tópico, existen teorías relacionadas con el diseño y operación de sistemas de manufactura que buscan racionalizar el proceso de diseño de los mismos. En este sentido, en la literatura pueden encontrarse los trabajos de (Black, 1991; Cochran, 1994; Ham *et al*., 1985; Sohlenius, 1998; Suh *et al*., 1998; Van Brussel, Peng, y Valckenaers, 1993; Yien, 1998). Sin embargo, como en muchos otros campos del conocimiento, el diseño de los sistemas de manufactura en las compañías y

firmas industriales está basado en conocimiento empírico y algoritmos de simulación. El hecho de que el desarrollo tecnológico haya dirigido el diseño de estos sistemas más que los descubrimientos o teorías científicas, ha provocado que el conocimiento científico sobre estos sistemas presente un retraso acerca del tópico (Suh *et al*., 1998). El diseño y operación de estos sistemas tiene un efecto en la productividad, el retorno de la inversión y la competitividad en el mercado. Las compañías han invertido y obtenido mayores beneficios a partir del mejoramiento de los mismos en conjunto con un mejor diseño de productos. De tal forma, es importante que exista un mayor entendimiento e interés de la comunidad científica sobre el estudio de los sistemas de manufactura para que esta situación mejore en beneficio de las empresas, los individuos y los países.

Diversas propuestas metodológicas han surgido para hacer eficientes los sistemas de manufactura mediante el mejoramiento de la administración de la información en una empresa de manufactura. La metodología IDEF0 (Functional Modelling Methodology) por ejemplo, presenta ventajas para integrar las operaciones de manufactura mediante la modelación de las decisiones y acciones de los sistemas para propósitos de análisis y comunicación (Marca y McGowan, 1993). Helander, (2002) y Maull y Jewitt (1987) explican que consiste en definir un conjunto de funciones donde para cada función contiene entradas (material o información a procesar), salidas (resultados de cada función), mecanismos (recursos utilizados) y restricciones (condiciones a las que cada función está sujeta), desplegados en una estructura jerárquica descendente. Para Yien (1998), IDEF0 resulta ser un modelo descriptivo con algunas guías para el diseño de sistemas.

Por otro lado, la manufactura esbelta, también conocida como el sistema Toyota de producción, es un paradigma que tiene un efecto en el pensamiento y práctica de los ingenieros de manufactura y en el diseño de sistemas de manufactura de tal forma que se satisfagan requerimientos de calidad, productividad y costo (Houshmand y Jamshidnezhad, 2006; Yien, 1998). El DA es otra de las metodologías que contribuyen al diseño y desarrollo de sistemas de manufactura. Se fundamenta en el uso de axiomas para hacer sistemas más eficientes y confiables. Además, ayuda el establecimiento los RF del sistema a diseñar, PD, VP y su estructura jerárquica y la prescripción de teoremas para el diseño de los mismos.

A lo largo de este capítulo se presentarán los fundamentos del DA en el diseño de los sistemas de manufactura a partir de una introducción al tema, los pasos a seguir en el diseño de los sistemas y casos de estudio encontrados en la literatura. El lector encontrará casos en el estado del arte, lo que le permitirá obtener una perspectiva más completa del uso y aplicación del DA en cuanto al diseño de sistemas de manufactura.

## DISEÑO AXIOMÁTICO DE SISTEMAS DE MANUFACTURA

Desde el punto de vista axiomático, el diseño de un sistema de manufactura ideal depende fuertemente de la selección y determinación de los RF que el sistema debe satisfacer dentro de ciertas restricciones dadas (RS), de manera que el sistema de manufactura ideal presentará variaciones en el tiempo, es decir, experimentará cambios de acuerdo con la selección de tales requerimientos específicos y las restricciones. Para, Suh *et al*. (1998), los RF y las RS son determinados o seleccionados implícita o intuitivamente y se ven afectados por las tecnologías que se tienen disponibles, las medidas de desempeño y el costo en una empresa de manufactura. En consecuencia, hasta el momento los sistemas no han sido realmente diseñados metodológicamente y son derivados de la experiencia y con base en sus medidas de desempeño.

La incursión de la teoría del DA en el diseño y mejoramiento de estos sistemas ha consistido principalmente en tratar de hacerlos eficientes a partir de un diseño racional basado en principios científicos. Asimismo, sus aplicaciones han intentado contribuir en el esclarecimiento y definición de los RF, Parámetros de Diseño (PD), restricciones (RS), variables de proceso (VP), así como en el modelado conceptual y jerarquía de estos requerimientos y PD de los sistemas de manufactura.

La tabla 6.2 presenta una relación de las principales aplicaciones del DA en el diseño de sistemas de manufactura. Está integrada de los autores, tipos de sistema de manufactura y su contribución al diseño de estos sistemas.

Tabla 6.2. Aplicaciones del DA en el diseño de sistemas de manufactura.

| Autor | Tipo de Sistema de Manufactura | Metodología(s) | Contribución |
|---|---|---|---|
| Suh *et al.* (1998) | Sistema de Manufactura de flujo celular. (Caso hipotético) | Diseño Axiomático | Se establecen de los pasos para el diseño de los sistemas. Teorema de los sistemas “empujar y jalar”. Utilización del axioma de información para la selección del mejor sistema disponible. Estructura jerárquica para RFs y PD. |
| David S Cochran, Eversheim, Kubin, y Sesterhenn (2000) | Sistemas de manufactura tradicional y celular. | Diseño Axiomático y manufactura esbelta. | Proponen un método para convertir un sistema pequeño y flexible para hacerlo más efectivo en base a principios de manufactura esbelta y el axioma de independencia del DA. |
| Kulak, Durmusoglu, y Tufekci (2005) | Sistema tradicional y celular (Caso real, manufactura de rieles para escaleras de aluminio) | Diseño Axiomático | Se desarrolla una metodología para transformar un sistema tradicional (línea de transferencia) a un sistema de manufactura celular. |
| Thielman y Ge (2006) | Sistemas de gran escala. Numerosas partes y funciones como por ejemplo plantas automotrices y nucleares. | Diseño Axiomático Angularidad Semiangularidad Diseño de Experimentos Superficie de Respuesta | Se propone una nueva metodología para evaluar eficiente y sistemáticamente sistemas de gran escala para optimizar el cumplimiento de múltiples objetivos que compiten entre sí. |
| Houshmand y Jamshidnezhad (2006) | Sistemas de manufactura en general. | Diseño axiomático Manufactura esbelta. | Se propone un modelo que esclarece la relación causal entre RF-PD-VP. Clarifica el papel de las VP en los sistemas de producción con manufactura esbelta. Clarifica el establecimiento de la estructura jerárquica en sistemas con manufactura esbelta. |
| Nakao, Kobayashi, Hamada, Totsuka, y Yamada (2007) | Sistemas de manufactura en general. (Sastrería) | Diseño Axiomático | Se aplica del axioma de información para reducir el tiempo de entrega eliminando los acoplamientos. Se proponen 2 reglas para ello, la primera regla consiste en no obtener retroalimentación de procesos posteriores y redujo el tiempo de entrega a 2.1 días. La segunda regla consiste en no adelantar órdenes tardías de productos redujo el tiempo de 10.5 a 7.7 días. |
| Schnetzler, Sennheiser y Schönsleben (2007) | Sistemas de manufactura dentro de la cadena de suministros. | Diseño Axiomático | Se propone un método para el desarrollo sistemático e implementación de una estrategia para la cadena se suministros que genere valor a las compañías. |
| Dermusuglu y Kulak (2008) | Sistemas administrativos emulando un sistema de manufactura celular. | Diseño Axiomático Manufactura Esbelta. | Propone una guía de solución para el diseño de células de oficinas en sistemas administrativos, emulando un sistema de manufactura. Contribuye a reducir las actividades que no agregan valor en funciones administrativas en una empresa con manufactura esbelta. |

Esta revisión permite apreciar la fuerte influencia de la manufactura esbelta como modelo en el diseño de sistemas de manufactura. El mejoramiento del desempeño de los sistemas y la obtención de mayores utilidades se distinguen entre los RF comunes en estas aplicaciones. Estos RF tratan de ser satisfechos mediante diversos PD; entre ellos están: la reducción y eliminación del desperdicio en diversas formas y mediante sistemas o estrategias de información, comunicación y motivación. Asimismo, se distinguen esfuerzos por encontrar métodos efectivos para el diseño del sistema de manufactura ideal.

En este sentido, Haushmand y Jamshidnezhad (2006) establecen que entre las características generales de un método para el diseño de un sistema de manufactura ideal deben estar las siguientes:

- Ser comprensivo, al considerar todos los aspectos posibles
- Simple, para que pueda ser ampliamente utilizado por ingenieros
- Eficiente, con mínimas acciones de ensayo y error
- Prescriptivo en lugar de descriptivo, al recomendar las soluciones
- Analítico en lugar de heurístico, para encontrar soluciones óptimas
- Poderoso en el análisis multidimensional, que involucra intercambios entre calidad, costo y productividad.
- Programable, para aplicarse mediante el desarrollo de tecnologías de cómputo.
- Teórico-práctico.
- Aplicable a problemas de evaluación de diseños y rediseños.

## PASOS DE DA EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE MANUFACTURA

En esta sección se resumen los pasos para el diseño de sistemas de manufactura propuestos por Suh (2001). En ellos se explica la construcción de estos sistemas siguiendo principios de DA. Posteriormente, se presentan otros casos de estudio con algunas variaciones que han realizado otros autores con el mismo propósito para referencia y discusión del lector.

### Paso 1. Elegir RF en el dominio funcional

El primer paso para diseñar un sistema de manufactura es determinar los RF de más alto nivel del sistema de manufactura que se desea diseñar. Por lo que, a pesar de existir diversidad de conjuntos que pretenden satisfacer el diseño de dicho sistema, independientemente del que se seleccione, este debe realizarse de acuerdo con la definición de RF bajo ciertas circunstancias dadas (Suh, 1990). Por ello, el sistema resultante dependerá del conjunto electo.

La mayoría de las empresas de manufactura indicarían el RF más alto de su sistema de manufactura, como:

- $RF_1$: Maximizar el retorno de inversión

$RF_1$ está basado en el interés de los propietarios o accionistas de una compañía manufacturera, que es el beneficio. Es importante notar que hay tres partes muy diferentes interesadas en los sistemas de manufactura: los accionistas (propietarios), los empleados (clientes internos), y los clientes externos que compran los productos fabricados por el sistema de manufactura.

A pesar de que el siguiente diseño inicia con el punto de vista de los accionistas, conforme se desarrollan la descomposición y las necesidades de los clientes internos y externos, son incluidos los RF de más bajo nivel.

Aquí se debe observar que todos los RF inician con verbos. Esta es una buena manera de distinguir un RF de un PD, el cual debe iniciar con un sustantivo, si es posible.

## Paso 2. Mapeo de RF en el dominio físico

El segundo paso es mapear el dominio funcional al dominio físico para determinar los PD que puedan satisfacer los RF en este nivel. Cabe mencionar que, para un conjunto dado de RF, pueden existir muchos conjuntos diferentes de PD, tal como sucede en los sistemas de manufactura. Por ejemplo, para satisfacer RF1 del paso 1, se puede elegir uno de los siguientes dos PD como el correspondiente PD1:

**$PD_1^a$**: Sistema de manufactura para suministrar productos a un costo mínimo.

**$PD_1^b$**: Sistema de manufactura diseñado para suministrar productos de alta calidad que cumplan las necesidades del cliente.

Las consecuencias de elegir $PD_1^a$ en lugar de $PD_1^b$ (o viceversa) pueden ser muy importantes conforme se desarrolle el diseño detallado mediante la descomposición.

## Paso 3. Descomponer $RF_1$ en el dominio funcional-zigzagueo entre los dominios

Una vez que se definió $RF_1$ y $PD_1$ en el nivel más alto. El siguiente paso en DA es regresar (es decir, “zigzaguear”) del dominio físico al dominio funcional, si el $PD_1$ que se eligió no puede ser implementado sin un diseño más detallado (es decir, hasta que se alcance el nivel de la hoja). Los RF de nivel más bajo deben ser determinados por descomposición de $RF_1$, lo cual es equivalente a determinar los RF del PD que se eligió (es decir, $PD_1^a$ o $PD_1^b$). Si el diseñador selecciona $PD_1^a$ los correspondientes RF del siguiente nivel pueden ser diferentes o iguales si se elige $PD_1^b$. Para el caso particular que $PD_1^a$ o $PD_1^b$ sean tomados en cuenta, $RF_1$ se descompone como:

» $RF_{11}$: Incrementar los ingresos de las ventas

» $RF_{12}$: Minimizar el costo de producción

» $RF_{13}$: Minimizar la inversión en manufactura

Estos RF se obtienen de la ecuación 6.1 para calcular el retorno de inversión, y por lo tanto, son los mismos para $PD_1^a$ y $PD_1^b$.

$$\text{Retorno de Inversión} = \frac{\text{Ventas} - \text{Costo}}{\text{Inversión}} \qquad \text{Ecuación 6.1}$$

## Paso 4. Determinar el Correspondiente $\{PD_{1X}\}$ mediante el Mapeo de $\{RF_{1X}\}$ en el Dominio Físico

Ahora se debe encontrar $\{RF_{1X}\}$ que corresponda a $RF_{11}$, $RF_{12}$ y $RF_{13}$. Estos $\{PD_{1X}\}$ son también los productos de descomposición de $PD_1^a$ o $PD_1^b$. Por lo tanto, el $\{PD_{1X}\}$ puede ser diferente, dependiendo de si se eligió $PD_1^a$ o $PD_1^b$ en el Paso 2.

Para $PD_1^a$, la descomposición del siguiente nivel de la jerarquía de PD puede estar basada en la situación de manufactura en 1913 cuando los sistemas de producción en masa evolucionaron.

$PD_{11}^a$: Maximizar los resultados de producción.

$PD^a_{12}$: Minimizar el Costo Unitario.

$PD^a_{13}$: Maximizar la utilización del equipo.

Está claro que este diseño del sistema de manufactura trabaja bien cuando hay demanda ilimitada para un producto nuevo e innovador. Por ejemplo, cuando estuvieron disponibles los primeros automóviles de bajo costo debido a la implementación de la producción en masa y al diseño de los autos de Henry Ford.

Para $PD^b_1$, el correspondiente $\{PD_{1X}\}$ puede ser elegido como:

$PD^b_{11}$: Diseño y productos de manufactura para maximizar la satisfacción del cliente.

$PD^b_{12}$: Costo de la Producción Objetivo.

$PD^b_{13}$: Costo de la Producción Objetivo.

Este segundo tipo de sistema de manufactura es diseñado para incrementar los ingresos de ventas mientras disminuye los costos e inversión haciendo productos que los clientes quieren tener cuando ellos los quieren tener. Esta puede ser una buena estrategia cuando hay sobrecapacidad de instalaciones de producción y cuando el diseño, la entrega, calidad y precio de los productos determina la competitividad.

## Paso 5. Determinar la matriz de diseño

Una vez determinados $\{RF_{1X}\}$ y $\{PD_{1X}\}$ para dos diferentes elecciones de $PD_1$, la matriz de diseño debe ser creada para determinar si el diseño propuesto viola el Axioma de Independencia. La Ecuación 6.2 y matriz de diseño son:

$$\begin{Bmatrix} RF11 \\ RF12 \\ RF13 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD^a_{11} \\ PD^a_{12} \\ PD^a_{13} \end{Bmatrix} \qquad \text{Ecuación 6.2}$$

*X* significa una fuerte relación entre los RFs y los PDs. Este diseño representa el diseño del sistema de producción en masa para la industria automotriz a principios de 1900. Era un diseño desacoplado. El orden de implementación fue $PD^a_{11}$, $PD^a_{13}$ y luego $PD^a_{12}$. Para incrementar los ingresos por ventas, el PD de la empresa fue fabricar más productos. La clásica declaración de que “puedes comprar cualquier vehículo de cualquier color siempre y cuando sea negro” fue realmente el resultado de la tremenda presión para disminuir el tiempo de ciclo de la operación en la empresa Ford (Arnold y Faurote, 1915), y la pintura negra secó más rápido que cualquier otro color de pintura. Segundo, la alta utilización de la máquina ($PD^a_{13}$) redujo la inversión en manufactura debido a las economías de escala. Además, $PD^a_{13}$ tenía un fuerte efecto en el costo de manufactura. Las máquinas fueron diseñadas para eliminar el trabajo directo.

Sin embargo, en términos de dinámica actual de fuerzas de mercado, la Ecuación de diseño 6.3 se ve muy diferente para $PD^a_{1X}$. La nueva matriz de diseño que refleja la relación actual entre RF y PD puede ser escrita como:

$$\begin{Bmatrix} RF11 \\ RF12 \\ RF13 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD_{11}^{a} \\ PD_{13}^{a} \\ PD_{12}^{a} \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.3

Esta matriz de diseño muestra que los diseños del sistema de manufactura cambian a través del tiempo. $PD_{11}^{a}$ ya no satisface $RF_{11}$ debido a que la fabricación de más productos hoy en día no garantiza que un producto vaya a ser comprado.

El segundo diseño, representado por $PD_{1x}^{b}$, satisface mejor $\{RF_{1x}\}$ en el actual ambiente de mercado, donde los clientes son más demandantes y la presión competitiva es mucho mayor debido a la sobrecapacidad de las instalaciones de manufactura en el mundo.

$$\begin{Bmatrix} RF11 \\ RF12 \\ RF13 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD_{11}^{b} \\ PD_{12}^{b} \\ PD_{13}^{b} \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.4

El análisis de las matrices de diseño 6.3 y 6.4 ilustra que $PD_{1x}^{b}$*s* constituyen una mejor solución de diseño para los sistemas de manufactura. Sólo se seguirá el segundo diseño en esta sección. Por lo tanto, de ahora en adelante, se eliminará el superíndice b de $PD_{1}^{b}$ y se usará $PD_1$ por simplicidad.

Después de que se haya completado el diseño, las *X* pueden ser remplazadas con expresiones precisas o constantes a través del modelado de la física o geometría del diseño. Como se discutió en los capítulos 4 y 5, el modelado se hace para las ecuaciones de diseño de nivel más bajo (llamadas "hojas"), ya que las ecuaciones de diseño de más alto nivel se componen de los parámetros y matrices de diseño de más bajo nivel.

## Paso 6. Descomponer $RF_{11}$, $RF_{12}$, $RF_{13}$ del Dominio Físico al Dominio Funcional y Determinar los Correspondientes PD (Nivel 3)

### Paso 6a. $RF_{11}$– Rama de los ingresos por ventas

$RF_{11}$ (Incremento de los ingresos de ventas) debe ser descompuesto con $PD_{11}$ en mente, el cual es "Diseño y producción de productos para maximizar la satisfacción del cliente". El ingreso por ventas (IV) es igual al producto del número de productos vendidos y el precio por unidad, lo cual puede ser expresado como:

$$IV = \sum_{i=1}^{n} (\text{Precio}_i \times \text{Volumen}_i)$$ Ecuación 6.5

Donde *n* es el número de tipos de productos. Luego $RF_{11}$ puede ser descompuesto, con $PD_{11}$ en mente, como:

- $RF_{111}$**:** vender productos al precio más alto aceptable
- $RF_{112}$**:** Aumentar la cuota del mercado (volumen)

Los correspondientes PD pueden ser elegidos como:

- $PD_{111}$**:** Valor del producto percibido por el cliente

– $PD_{112}$: Aplicaciones amplias del producto

La matriz de diseño para los conjuntos de RF y PD es:

$$\begin{Bmatrix} RF111 \\ RF112 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD111 \\ PD112 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.6

Naturalmente, para incrementar los ingresos por ventas, el objetivo es vender productos al precio más alto aceptable ($RF_{111}$) ahora y en el futuro. Es por eso que es importante mantener y mejorar el valor del producto percibido por el cliente. $PD_{111}$ también afecta $RF_{112}$ porque los clientes satisfechos contribuyen a la cuota del mercado de dos maneras: repetición de compras y referencias de productos (publicidad gratuita) para nuevos clientes potenciales. Una acción específica para incrementar la cuota del mercado ($RF_{112}$) es satisfecha por una política de diseño para ampliar las aplicaciones del producto ($PD_{112}$). Este diseño es un diseño desacoplado y por lo tanto satisface el Axioma de Independencia.

## Paso 6b. $RF_{12}$ – Rama del Costo de Producción

$RF_{12}$ (Minimizar el Costo de Producción) se descompone con $PD_{12}$ (costo de producción objetivo) como:

– $RF_{121}$: Reducir costos de material.

– $RF_{122}$: Reducir costos de actividad operacional.

– $RF_{123}$: *Reducir gastos generales.*

Los elementos del costo de producción son el costo de materias primas y componentes, el costo directo, costo indirecto, y costos administrativos o costos generales. Los correspondientes PD se definen como:

– *$PD_{121}$: Precio tope dado a los proveedores*

– *$PD_{122}$: Rendimiento objetivo de actividades operacionales*

– *$PD_{123}$: Procesos de negocio de tamaño adecuado*

Los RF y PD en itálica no necesitan ser descompuestos porque los PD pueden ser implementados. Estos son hojas. Sin embargo, otros RF y PD deben ser descompuestos.

El costo de las materias primas y de los componentes comprados a los proveedores está basado en su precio, el cual afecta fuertemente el costo de los productos y los beneficios. Sin descomposición adicional para satisfacer $RF_{121}$, el $PD_{121}$ -precio tope dado a proveedorespuede ser implementado.

La clasificación de costo directo e indirecto es útil para efectos contables, pero para reducir los costos de producción, todas las actividades deben ser analizadas. El costo directo está relacionado con los departamentos que realizan actividades de valor agregado a la pieza, tales como los departamentos de maquinado o ensamble. El costo indirecto está relacionado con los departamentos que realizan actividades que no agregan valor a la pieza, por ejemplo, mantenimiento o cuartos de almacén. Esta clasificación es inútil cuando se necesita reducir costos. Hay actividades realizadas en los departamentos de maquinado, tales como transporte de piezas y excesivo manejo de materiales, que no agregan valor. También hay actividades realizadas en departamentos de costo indirecto, tales como mantenimiento preventivo, que son extremadamente importantes para las actividades de valor agregado de los departamentos de costo directo. Se debe analizar qué actividades son realizadas en la producción, con un mayor enfoque en aquellas actividades que no agregan valor, e identificar qué acciones (PD) es válido reducir o eliminar. Más aún, se debe enfocar esfuerzos en optimizar las actividades de valor agregado y en aquellas actividades que no agregan valor, tales como mantenimiento y configuración, que tienen un efecto fundamental en el desempeño de la producción. Las actividades realizadas en el ambiente de producción se llamarán actividades operacionales. La

meta luego es "reducir el costo total de la actividad operacional" definidos como $RF_{122}$, y el $PD_{122}$ que satisface este RF es "desempeño objetivo de actividades operacionales".

El costo administrativo, que está relacionado a todas las actividades administrativas, no será considerado en la descomposición de este diseño de sistema de producción. Sólo se planteará que para satisfacer $RF_{123}$ sin descomposición adicional, el $PD_{123}$ debe ser definido "Procesos de negocio de tamaño adecuado". La ecuación de diseño y las matrices son:

$$\begin{Bmatrix} RF121 \\ RF122 \\ RF123 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD121 \\ PD122 \\ PD123 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.7

Este diseño es un diseño no acoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

## Paso 6c. $RF_{13}$ – Rama de inversión de capital

$RF_{13}$ (minimizar la inversión de producción) puede ser descompuesto con $PD_{13}$ (inversión en instalaciones de producción y máquinas, basados en un enfoque de sistema de pensamiento) en mente, como:

- $RF_{131}$: Adquirir máquinas con tiempos de ciclo menor que o igual al tiempo TAKT (es decir, el intervalo de tiempo entre dos partes consecutivas saliendo del sistema).
- $RF_{132}$: Asegurar flexibilidad para adaptarse a los incrementos de capacidad al más bajo costo.
- $RF_{133}$: Desarrollar herramientas flexibles.
- $RF_{134}$: Asegurar flexibilidad para adaptarse a productos futuros.

Los correspondientes PD pueden ser definidos como:

- $PD_{131}$: Diseño de máquina enfocado en el ritmo de demanda del cliente y en el trabajo de valor agregado
- $PD_{132}$: Sistema de manufactura de células enlazadas
- $PD_{133}$: Diseño de herramientas flexibles
- $PD_{134}$: Máquinas móviles y estaciones reconfigurables para permitir diseño de nuevas células.

La adquisición de máquinas para satisfacer $RF_{131}$ agrega una nueva dimensión para minimizar la inversión en el ambiente de producción, mientras se producen las partes al ritmo que los clientes quieren. Porque en un número de casos existe la posibilidad de incrementar el tiempo de ciclo de la máquina, los ingenieros de manufactura tienen nuevas oportunidades de adquirir máquinas más simples y reducir el nivel requerido de automatización. $PD_{132}$ dirige la respuesta para incrementos mayores y más rápidos en la demanda. La replicación de las células de manufactura tiene una decisión y un tiempo de adquisición más corto y agrega un incremento más pequeño de capacidad que las líneas de transferencia, incrementando la flexibilidad del sistema para adaptarse a los incrementos de capacidad al más bajo costo $RF_{132}$. La inversión en herramienta flexible y equipo reconfigurable incrementa aún más la flexibilidad a largo plazo.

La ecuación de diseño y la matriz son:

$$\begin{Bmatrix} RF131 \\ RF132 \\ RF133 \\ RF134 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD131 \\ PD132 \\ PD133 \\ PD134 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.8

El diseño es desacoplado y, por lo tanto, satisface el axioma de independencia.

# Paso 7. Descomposición de cuarto nivel

## Paso 7a. $RF_{11}$ – Rama de Ingresos por Ventas

El requerimiento funcional $RF_{111}$ (vender productos al precio más alto aceptable) debe ser descompuesto con $PD_{111}$ (valor del producto mejorado percibido por el cliente) en mente. $RF_{111}$ se descompone como:

- $RF_{1111}$: Incrementar la solicitación de productos proporcionando funciones y características deseadas.
- $RF_{1112}$: Incrementar la confiabilidad de los productos
- $RF_{1113}$: Proporcionar una entrega a tiempo (para una variedad de productos.
- $RF_{1114}$: Disminuir la variación del tiempo de entrega
- $RF_{1115}$: Proporcionar un servicio efectivo después de las ventas.

Los correspondientes PDs son:

- $PD_{1111}$: Diseño de productos de alta calidad que cumplan las necesidades del cliente como se especifica en los RFs y Rs.
- $PD_{1112}$: Diseño robusto de productos.
- $PD_{1113}$: Producción basada en demanda real.
- $PD_{1114}$: Resultados de producción predecibles.
- $PD_{1115}$: Red de servicio.

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} RF1111 \\ RF1112 \\ RF1113 \\ RF1114 \\ RF1115 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 \\ 0 & X & X & X & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1111 \\ PD1112 \\ PD1113 \\ PD1114 \\ PD1115 \end{Bmatrix} \qquad \text{Ecuación 6.9}$$

$RF_{1113}$ se logra a través de la producción basada en demanda real. $PD_{1113}$ es fundamental para evitar el tiempo largo de producción en los sistemas de producción en masa. En los tradicionales sistemas de producción en masa, la producción iniciaría basada en el pronóstico de ventas, pero como el pronóstico es siempre impreciso, la información relacionada con los volúmenes de venta y mezcla de productos cambiará. La producción debe estar basada en la demanda real para evitar retrasos en las fechas de vencimiento, sobreproducción o altos niveles de inventario. Para ser capaces de satisfacer a la demanda real, el tiempo de producción del sistema de producción debe ser radicalmente reducido. El correspondiente PD dirige la importancia de un nivel de producción predecible.

Un efecto importante sobre la habilitación de la producción basada en la demanda real, es que cuando las decisiones son tomadas para reducir o eliminar actividades que causan retrasos, esto no solo reduce el tiempo de producción sino también elimina fuentes de variación dentro del sistema de manufactura. Por ejemplo, cuando una célula de manufactura es creada con un flujo de piezas único, esto no solo elimina transportes y colas entre las máquinas, sino también elimina las fuentes de variación de tiempo. El diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

El $RF_{112}$ [incrementar la cuota (volumen) de mercado] debe ser descompuesto con $PD_{112}$ (aplicaciones amplias del producto) en mente. $RF_{111}$ se descompone como:

- $RF_{1121}$: Desarrollar productos especializados (nuevos o personalizados).

- $RF_{1122}$: Desarrollar múltiples soluciones dentro de la línea del producto.

Los correspondientes PDs son:

- $PD_{1121}$: Proceso corto de desarrollo del producto.
- $PD_{1122}$: Variedad de producto.

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} RF1121 \\ RF1122 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1121 \\ PD1122 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.10

El desarrollo de productos especializados ($RF_{1121}$) y el desarrollo de variedad de producto dentro de la misma línea de producto ($RF_{1122}$) son los RF para lograr $PD_{112}$ y para ampliar las aplicaciones del producto. Un corto proceso de desarrollo del producto ($PD_{1121}$) es esencial para el desarrollo de mercados especializados. El proceso de desarrollo del producto también afecta la habilidad para desarrollar una variedad de productos (u opciones) dentro de una línea existente del producto. El diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

## Paso 7b. $RF_{12}$– Rama del costo de producción

$RF_{122}$ (reducir los costos de la actividad operacional) puede ser descompuesto con $PD_{122}$ (rendimiento objetivo de las actividades operacionales) en mente como:

- $RF_{1221}$: Reducir costos de transporte
- $RF_{1222}$: Reducir costos de ajuste
- $RF_{1223}$: Reducir los costos de operaciones manuales (cargar ⁄ descargar máquina, ensamble, inspección)
- $RF_{1224}$: Reducir costos de fabricación
- $RF_{1225}$: Reducir costos de mantenimiento

Los correspondientes PDs son:

- $PD_{1221}$: Distribución orientada al flujo del producto
- $PD_{1222}$: Ajuste realizado con recursos reducidos
- $PD_{1223}$: Uso efectivo de la fuerza de trabajo
- $PD_{1224}$: Parámetros de fabricación basados en el tiempo TAKT para incrementar la vida de la herramienta
- $PD_{1225}$: Programa de mantenimiento productivo total

El objetivo es reducir el costo mientras se incrementa el desempeño de las principales actividades operacionales. Una de las principales diferencias en los modernos sistemas de producción es la separación de hombre y máquina en el análisis de las actividades. El desarrollo de máquinas autónomas proporciona la oportunidad para que el trabajador realice otras actividades mientras la máquina está trabajando. Por lo tanto, $RF_{1223}$ y $RF_{1224}$ pueden ser definidos de manera separada. $RF_{1221}$, $RF_{1222}$ y $RF_{1225}$ están relacionados a las actividades que requieren ser mejoradas de manera dramática mientras se reducen los costos. El transporte se debe hacer de manera más frecuente y en menores cantidades, el ajuste tiene que hacerse de manera más frecuente y mucho más rápido, y el mantenimiento debe mejorar la confiabilidad de la máquina.

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} \mathrm{RF1221} \\ \mathrm{RF1222} \\ \mathrm{RF1223} \\ \mathrm{RF1224} \\ \mathrm{RF1225} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{X} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{X} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{X} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathrm{X} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{X} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathrm{PD1221} \\ \mathrm{PD1222} \\ \mathrm{PD1223} \\ \mathrm{PD1224} \\ \mathrm{PD1225} \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.11

Otra vez, el diseño es no acoplado.

# Paso 8. Descomposición de quinto nivel

## Paso 8a. $RF_{11}$– Rama de Ingresos por ventas

$RF_{1112}$ (incrementar la confiabilidad de los productos) puede ser descompuesto con $PD_{1112}$ (diseño robusto de productos) en mente como:

- $RF_{11121}$: Determinar la menor rigidez tolerable del producto.
- $RF_{11122}$: Determinar el rango de diseño para la tolerancia de manufactura.
- $RF_{11123}$: Seleccionar operaciones de manufactura con un rango del sistema que esté dentro del rango de diseño.

Los correspondientes PD son:

- $PD_{11121}$: Modelo matemático pra la determinación de la rigidez.
- $PD_{11122}$: Modelo matemático para la derivación del rango de diseño para las VP.
- $PD_{11123}$: Máquinas seleccionadas con un apropiado rango del sistema para las VP.

La idea detrás de reducir la rigidez (es decir, reducir la magnitud del elemento diagonal del diseño) es esencial para el diseño robusto, como se discutió en los Capítulos 1 y 2 (Suh, 1995). La rigidez debe ser reducida hasta que la relación señal-ruido h≥ a su mínimo valor. La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} RF11121 \\ RF11122 \\ RF11123 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11121 \\ PD11122 \\ PD11123 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.12

La matriz de diseño es triangular, por lo tanto el diseño es desacoplado.

El requerimiento funcional $RF_{1113}$ (disminuir el tiempo promedio de entrega) debe ser descompuesto con $PD_{1113}$ (producción basada en demanda real) en mente como:

- $RF_{11131}$: Producir en el tiempo de ciclo demandado por el cliente.
- $RF_{11132}$: Producir la mezcla de cada tipo de parte demandada por intervalo de tiempo.
- $RF_{11133}$: Responder a los intervalos de tiempo demandados por el cliente.

Los correspondientes PD son:

- $PD_{11131}$: Sistema de manufactura de células enlazadas balanceado con la demanda del cliente.
- $PD_{11132}$: Nivel de producción.

– $PD_{11133}$: Disminución del tiempo de respuesta a través del sistema de producción.

Para satisfacer $RF_{11131}$, el PD es "sistema de manufactura de células enlazadas balanceado con la demanda del cliente". En un sistema de manufactura de células enlazadas, los procesos de manufactura y las operaciones son diseñados con tiempos de ciclo por debajo del tiempo TAKT; este tiempo establece el ritmo de producción necesario para cubrir la demanda del cliente con respecto al tiempo disponible para producción. De esta forma, todo el sistema producirá partes en el tiempo de ciclo demandado por el cliente. De manera similar, $PD_{11132}$ satisface $RF_{11132}$ con los elementos clave para reducir el tiempo de ajuste y un sistema de información para nivelar la producción. La figura 6.1 muestra un sistema de manufactura de células enlazadas balanceado con la demanda del cliente.

En la figura 6.1, las máquinas están organizadas en una estructura celular en que dos trabajadores se mueven en bucles opuestos al flujo de la pieza de trabajo (Cochran y Lima, 1998).

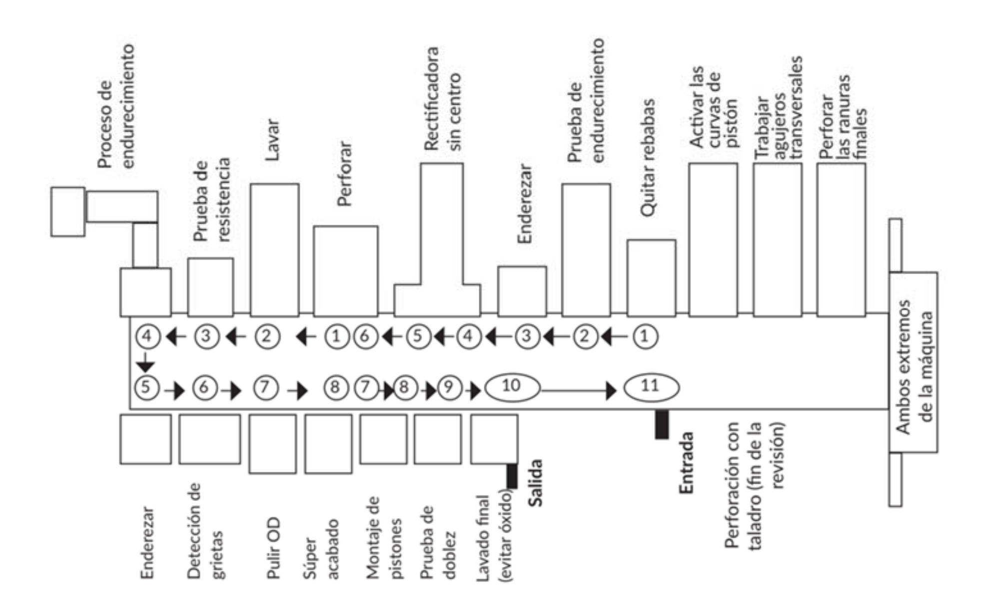



Figura 6.1. Un sistema de manufactura celular enlazado para ilustrar el concepto. Adaptado de Cochran y Lima (1998).

El tiempo de respuesta es definido como la suma del "tiempo administrativo" (transferencia de información), el "tiempo de rendimiento de manufactura" y el "tiempo de envío o transporte" (que es un tiempo interno en los casos donde no existe inventario de productos finales o partes). Esta suma no incluye el tiempo de rendimiento de manufactura, cuando las partes son entregadas desde el almacén. Para el cliente interno, el tiempo administrativo en un sistema de jalón es el tiempo requerido para enviar la información sobre el estado del sistema de manufactura (por ejemplo, tarjeta de Kanban) para la célula ascendente. La solución ideal es cuando el subsistema de producción puede satisfacer $RF_{11133}$ mediante $PD_{11133}$ con el mínimo o aun sin inventario. En el caso en el cual se requiera tener algún nivel de inventario, si el tiempo de reposición de la célula es corto, entonces los niveles de inventario son bajos.

Luego, la ecuación de diseño y las matrices son:

$$\begin{Bmatrix} RF11131 \\ RF11132 \\ RF11133 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11131 \\ PD11132 \\ PD11133 \end{Bmatrix} \qquad \text{Ecuación 6.13}$$

Cuando todas las máquinas o estaciones están corriendo al mismo tiempo TAKT, los tamaños de lote entre máquinas pueden reducirse a una unidad. Esto permite el flujo de partes en una sola pieza, con lo cual se elimina el retraso del lote y del transporte dentro del subsistema de manufactura (o célula). Cuando el sistema de manufactura produce la mezcla correcta de partes, se reducen o eliminan

retrasos en el proceso y, por lo tanto, se reduce el tiempo de producción y se incrementa la habilidad del sistema para "responder a la sincronización del cliente". Mucho se ha dicho sobre la importancia de reducir el tiempo de producción, pero algunas veces los mecanismos para alcanzar esta meta no son comprendidos. En la matriz de diseño anterior, es fundamental entender el impacto que $PD_{11131}$ y $PD_{11132}$ tienen como facilitadores para satisfacer $RF_{11133}$. La matriz de diseño anterior define este punto muy claramente. Este diseño es un diseño desacoplado y satisface el Axioma de Independencia.

El requerimiento funcional $RF_{1114}$ (disminuir la variación del tiempo de entrega) debe descomponerse con $PD_{1114}$ (nivel de producción predecible) en mente. $RF_{1114}$ puede descomponerse como:

– $RF_{11141}$: Responder rápidamente a problemas de producción.

– $RF_{11142}$: Producir con un nivel de calidad predecible.

– $RF_{11143}$: Producir con un tiempo predecible.

Los correspondientes PDs son:

– $PD_{11141}$: Sistema de control visual para proveer una respuesta rápida.

– $PD_{11142}$: Producción sin defectos y capaz de identificar la causa raíz.

– $PD_{11143}$: Recursos de producción predecibles.

La ecuación de diseño y matrices son:

$$\begin{Bmatrix} RF11141 \\ RF11142 \\ RF11143 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11141 \\ PD11142 \\ PD11143 \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.14

Los siguientes factores caracterizan este diseño desacoplado. El sistema visual requiere la visualización de hojas de cálculo estándares y planes de inspección en cada estación, y también la correcta visualización de todas las herramientas y dispositivos para reducir la ocurrencia de errores entre los trabajadores, con lo cual se mejora la calidad. Como el sistema de control visual permite una respuesta más rápida para eventos indeseables, también tiene un impacto benéfico sobre la habilidad del sistema de producción para tener un tiempo predecible. Conforme se reduce la generación de desechos y retrabajo, el sistema se hace más predecible en términos del tiempo. El diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

## Paso 8b. $RF_{12}$ – Rama de costos de manufactura

$RF_{1223}$ (reducir costos de operaciones manuales [cargar/descargar máquina, ensamble, inspección]) puede ser descomponerse con $PD_{1223}$ (uso efectivo de la fuerza de trabajo) en mente como:

– $RF_{12231}$: Reducir las tareas que limitan al trabajador a la máquina.

– $RF_{12232}$: Permitir al operador operar más de una máquina o estación.

– $RF_{11143}$: Planear recursos para producir con diferentes niveles de producción.

Los correspondientes PDs son:

– $PD_{12231}$: Máquinas y estaciones diseñadas para correr de manera autónoma.

– $PD_{12232}$: Circuitos de trabajo implementados en el diseño de una célula.

– $PD_{12233}$: Circuitos de trabajo estandarizados diseñados para diferentes volúmenes.

$RF_{12231}$ y su correspondiente $PD_{12231}$ (máquinas y estaciones diseñadas para correr de manera autónoma) permitió la separación del trabajador de la máquina. Un trabajador opera varios tipos de máquinas para mantener el trabajo con movimiento en un flujo continuo en el tiempo TAKT. En cada máquina, existe una parte ya está descargada cuando el operador llega a cargar una parte nueva. El trabajador carga la parte nueva y luego reinicia la máquina y camina para realizar una tarea similar en la siguiente máquina en la célula de manufactura. $RF_{12232}$ y su correspondiente $PD1_{2232}$ comprenden el diseño de la célula, ergonomía, y organización para permitir la implementación de circuitos de trabajo. Una vez que los elementos para los establecimientos de circuitos de trabajo están en su lugar, el siguiente paso es planear la configuración de los circuitos de trabajo para diferentes volúmenes de producción como resultado de la necesidad de acomodar las variaciones en la demanda, como lo establecido por $RF_{12233}$ y $PD_{12233}$. Una célula de manufactura puede ser capaz de trabajar con cuatro, tres, o dos trabajadores, dependiendo del tiempo de ciclo o tiempo TAKT real demandado por el cliente, y, por lo tanto, las escalas del costo operacional disminuyen cuando disminuye la demanda del cliente.

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} \mathrm{RF12231} \\ \mathrm{RF12232} \\ \mathrm{RF12233} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD12231 \\ PD12232 \\ PD12233 \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.15

El diseño es desacoplado.

## Paso 9. Descomposición de Sexto Nivel: $RF_{11}$ – Rama de Ingresos por Ventas

$RF_{11131}$ (producir en el tiempo de ciclo o tiempo TAKT demandado por el cliente) debe descomponerse con $PD_{11131}$ (sistema de manufactura de células enlazadas balanceado a la demanda del cliente) en mente. $RF_{11131}$ puede descomponerse como:

- $RF_{111311}$: Definir clientes, partes, y volúmenes para cada subsistema o célula dentro de la producción.
- $RF_{111312}$: Diseñar un subsistema para un rango en la variación de volumen.

Los correspondientes PD son:

- $PD_{111311}$: Configuración de subsistemas para permitir el flujo en un rango ideal de tiempos de ciclo.
- $PD_{111312}$: Célula o subsistema diseñado para cumplir con el mínimo tiempo TAKT.

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} RF111311 \\ RF111312 \\ RF111313 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11141 \\ PD11142 \\ PD11143 \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.16

Este diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

El $RF_{11132}$ (producir la mezcla de cada tipo de parte demandado por intervalo de tiempo) debe ser descompuesto con $PD_{11132}$ (nivel de producción) en mente. $RF_{11132}$, puede descomponerse como:

- $RF_{111321}$: Producir en corridas de tamaños pequeños.
- $RF_{111322}$: Transportar en cantidades pequeñas y consistentes.
- $RF_{111323}$: Producir y proveer sólo las partes necesarias.

Los correspondientes PDs son:

- $PD_{111321}$: Configuración realizada en menos de 10 minutos.
- $PD_{111322}$: Contenedores estándares que contienen pequeñas cantidades de partes.
- $PD_{111323}$: Sistema de información para producir sólo las partes necesarias (sistema de jalón).

El nivel de producción controla la mezcla de productos producidos y el tamaño de la corrida de producción dentro de un intervalo de tiempo dado. Un sistema de jalón envía una señal de información a una célula de carga para proporcionar la célula de descarga con las partes requeridas en cantidades estándares. Por lo tanto, los cortos tiempos de configuración y los contenedores estándares son importantes facilitadores del nivel de producción. El nivel de producción permite al sistema de manufactura suministrar en pequeñas cantidades y, por lo tanto, el sistema puede suministrar solo las partes necesarias.

La ecuación de diseño y las matrices son:

$$\begin{Bmatrix} \mathrm{RF111321} \\ \mathrm{RF111322} \\ \mathrm{RF111323} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathrm{PD111321} \\ \mathrm{PD111322} \\ \mathrm{PD111323} \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.17

Este diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

$RF_{11133}$ (Responder a las bajas repentinas en el intervalo de tiempo demandado por el cliente) debe ser descompuesto con $PD_{11133}$ (tiempo de respuesta reducido en el sistema de producción) en mente. $RF_{11133}$, se descompone como:

- $RF_{111331}$: Reducir el tiempo de reposición del sistema por debajo del intervalo demandado por el cliente.
- $RF_{111332}$: Asegurar que suficientes partes estén disponibles para satisfacer el intervalo de demanda del cliente.

Los correspondientes PD son:

- $PD_{111331}$: Eliminación de desperdicios que causan tiempo de espera excesivo
- $PD_{111332}$: Cantidad de partes estándar de partes de trabajo en proceso

Para satisfacer $RF_{111331}$, el PD es eliminar los desperdicios que causan exceso de tiempo de espera. Para sistemas de producción repetitivos, el intervalo de la demanda del cliente es el intervalo de tiempo entre el transporte a la célula de descarga. La célula debe ser capaz de remplazar las partes en el inventario estándar durante el intervalo de demanda del cliente.

Para satisfacer $RF_{111332}$, es necesario implementar un inventario estándar de partes ($PD_{111332}$). Conforme el tiempo de espera de la célula disminuye, la habilidad del sistema para asegurar que las partes están disponibles para el cliente incrementa. Disminuir el tiempo de espera también hace posible reducir de manera proporcional el tamaño del inventario estándar, como se puede apreciar en la ecuación de diseño mostrada abajo.

$$\begin{Bmatrix} RF111311 \\ RF111312 \\ RF111313 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD11141 \\ PD11142 \\ PD11143 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.18

Este diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

$RF_{11142}$ (Producir con un resultado de calidad predecible) debe ser descompuesto con $PD_{11142}$ (producción sin defectos y con la habilidad para identificar la causa raíz) en mente. $RF_{11142}$, puede descomponerse como:

- $RF_{111421}$: Asegurar procesos eficientes.
- $RF_{111422}$: Disminuir las fuentes de variación debido a múltiples trayectorias de flujo.
- $RF_{111423}$: Prevenir todo tipo de defectos.
- $RF_{111424}$: No avanzar con los defectos a la siguiente operación.

Los correspondientes PDs son:

- $PD_{111421}$: Máquinas, equipo, herramientas y escantillones eficientes
- $PD_{111422}$: Trayectoria única a través del sistema de manufactura y proveedor externo (sin procesamiento paralelo)
- $PD_{111423}$: Uso de normas y dispositivos para prevenir defectos
- $PD_{111424}$: Inspecciones sucesivas para detectar defectos si ocurren

En una empresa de flujo continuo, no debe existir conflicto entre la calidad y la cantidad. La calidad siempre debe prevalecer. No debe existir flujo al menos que se fabriquen partes de alta calidad. Esta filosofía representa la principal diferencia entre la práctica común de fabricar productos pobres y arreglarlos posteriormente. Para lograr un rendimiento de alta calidad, las máquinas y el equipo deben ser capaces ($PD_{111421}$), pero, aún más importante, se deben prevenir los defectos mediante ($PD_{111423}$), o mediante la detección temprana para evitar que partes defectuosas fluyan hacia las siguientes operaciones ($PD_{111424}$).

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} RF111421 \\ RF111422 \\ RF111423 \\ RF111424 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD111421 \\ PD111422 \\ PD111423 \\ PD111424 \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.19

Este diseño es desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

## Paso 10. Descomposición de séptimo nivel: $RF_{11}$– Rama de Ingresos Por Ventas

El requerimiento $RF_{111312}$ (diseñar un subsistema para un rango de fluctuaciones de volumen) debe ser descompuesto con $PD_{111312}$ (subsistema diseñado para satisfacer el mínimo tiempo TAKT) en mente. $RF_{111312}$, puede descomponerse como:

- $RF_{1113121}$: Seleccionar el proceso de manufactura adecuado.
- $RF_{1113122}$: Diseñar un tiempo de ciclo del proceso de manufactura en cada estación para cumplir con el mínimo tiempo TAKT.
- $RF_{1113123}$: Diseñar escantillones en las estaciones que permitan lograr el mínimo tiempo TAKT.

Los correspondientes PDs son:

- $PD_{1113121}$: Física del proceso de manufactura.

- $PD_{1113122}$: Contenido de trabajo del proceso de manufactura definido para ser menor que el mínimo tiempo TAKT.
- $PD_{1113123}$: Diseño de escantillón para facilitar una rápida carga⁄descarga (dentro de la tolerancia requerida).

La ecuación de diseño es:

$$\begin{Bmatrix} RF1113121 \\ RF1113122 \\ RF1113123 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} PD1113121 \\ PD1113122 \\ PD1113123 \end{Bmatrix}$$ Ecuación 6.20

Este es un diseño desacoplado y por lo tanto satisface el axioma de independencia.

## CASO DE ESTUDIO

Diseño de un sistema de manufactura celular siguiendo principios de Diseño Axiomático (Houshmand y Jamshidnezhad, 2006; Kulak *et al*., 2005).

Otro caso representativo de la aplicación del DA en sistemas de manufactura es el trabajo de Kulak *et al*. (2005). En él se proponen los pasos para diseñar un sistema de manufactura celular. En este apartado se resumen las partes esenciales de este diseño para referencia del lector. A diferencia del diseño propuesto por Suh (2001), el RF de primer nivel es producir de acuerdo con las necesidades del cliente; y para satisfacer este requerimiento, el PD es diseñar un sistema de manufactura celular. A partir de ahí se derivan cuatro RF principales con sus respectivos PD. Este caso se describe a continuación.

### Paso 1. Elección de los RF en el dominio funcional

RF: Producir de acuerdo con las necesidades del cliente

Para ello, se debe proveer una mayor variedad de productos, en lotes más pequeños, con la más alta calidad y en entregas más frecuentes, a un costo menor. Estos requerimientos han forzado a las compañías a reevaluar sus sistemas de manufactura para una respuesta más flexible a las necesidades de sus clientes. Tal flexibilidad se mide de acuerdo con la velocidad y la habilidad de responder rápidamente a las necesidades cambiantes de sus clientes.

### Paso 2. Mapeo de los RF en el dominio físico

Los PD que satisfacen los RF establecidos en el paso anterior se seleccionan a través de un proceso de mapeo entre el dominio funcional y el dominio físico. Su selección debe realizarse a partir de un proceso exhaustivo donde se generan los PD. En este caso, el PD es el siguiente:

PD**:** Diseño de un sistema de manufactura celular.

Al parecer, este es el sistema que puede responder a las necesidades del cliente de manera eficiente, teniendo en mente los principios de manufactura esbelta.

### Paso 3. Descomponer los RF en el dominio funcional mediante el zigzagueo entre dominios.

Si los PD propuestos para satisfacer los RF definidos en pasos anteriores no pueden ser implementados sin ser aclarados más detalladamente, DA recomienda regresar al dominio funcional para descomponer los RF en su conjunto más bajo.

Los siguientes conforman el conjunto de Requerimientos Funcionales definidos para descomponer el RF de primer nivel establecido en el paso 1.

- $RF_1$: Clasificar y agrupar los productos /partes y máquinas para un mejor flujo de material.
- $RF_2$: Desarrollar la capacidad de los recursos de acuerdo a las especificaciones de los productos.
- $RF_3$: Administrar los recursos para minimizar el desperdicio.
- $RF_4$: Proveer de productos de acuerdo a la demanda del cliente.

## Paso 4. Encontrar los PD correspondientes de acuerdo al mapeo de los RF en el dominio físico.

Para satisfacer los RF definidos anteriormente, se debe hacer el proceso de zig-zag del dominio físico al dominio funcional. Los siguientes son los PD establecidos para responder a tales RF.

- $PD_1$: Mediante un procedimiento para definir familias de productos/partes y grupos de máquinas.
- $PD_2$: Mediante un Procedimiento para desarrollar la capacidad de producción necesaria en los recursos disponibles.
- $PD_3$: Mediante una Distribución física de la planta orientada al producto.
- $PD_4$: Mediante un Sistema para el Control de la Producción de "Jalar".

## Paso 5. Determinar la matriz de diseño

Una vez que las relaciones entre RF-PD han sido establecidas en los pasos 3 y 4, la matriz de diseño correspondiente ayuda a representar tales relaciones entre los elementos. Es importante asegurarse de que la matriz satisface el axioma de independencia de DA. Si la matriz es no acoplada o desacoplada, esto se cumple. En este caso, la ecuación de la matriz de diseño es la siguiente:

$$\begin{Bmatrix} \mathrm{RF111421} \\ \mathrm{RF111422} \\ \mathrm{RF111423} \\ \mathrm{RF111424} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathrm{PD111421} \\ \mathrm{PD111422} \\ \mathrm{PD111423} \\ \mathrm{PD111424} \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.21

Es un diseño desacoplado. El símbolo X representa una fuerte relación entre los pares correspondientes entre RF-PD.

## Paso 6. Descomponer $RF_1$, $RF_2$, $RF_3$ y $RF_4$ entre el Dominio Físico y Dominio Funcional y de nuevo determinar los PDs correspondientes

$$\begin{Bmatrix} \mathrm{RF111411} \\ \mathrm{RF111412} \\ \mathrm{RF111413} \\ \mathrm{RF111414} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathrm{PD111411} \\ \mathrm{PD111412} \\ \mathrm{PD111413} \\ \mathrm{PD111414} \end{Bmatrix}$$

Ecuación 6.22

## RESUMEN

La utilización del DA en el diseño de sistemas de manufactura puede ayudar a crear modelos prescriptivos, claros, al definir las metas representadas como RF y entendibles de una manera significativa, desarrollar una relación causal entre las soluciones (PD), métodos, herramientas, y recursos (PV) y las metas de diseño (RF).

El DA en modelos de sistemas de manufactura puede tener aplicaciones prácticas para sistemas de manufactura esbelta.

Según Houshmand y Jamshidnezhad (2006), resulta muy útil para:

- Clarificar e implementar herramientas, técnicas, recursos para manufactura esbelta.
- Explicar los principios de manufactura esbelta.
- Predecir los resultados de las acciones emprendidas.
- Dar dirección a los progresos futuros.
- Tomar decisiones y controlar las actividades en cuanto a la distribución de los recursos durante la implementación de manufactura esbelta.
- Facilitar la comunicación con otros profesionales, ya que brinda un lenguaje y un marco de referencia comunes.
- El aprendizaje, porque resume el conocimiento para ser difundido entre nuevos integrantes de los equipos de trabajo.

## REFERENCIAS

ARNOLD, H. L. y Faurote, F. L. (1915). *Ford methods and the Ford shops*. The Engineering Magazine Company.

BLACK, J. T. (1991). *The design of the factory with a future*. New York: McGraw-Hill.

COCHRAN, D., y Lima, P. (1998). Production system design: theory. *Evaluation and Implementation (in preparation)*.

COCHRAN, D., y Lima, P. (1998). The production system design decomposition, Version 4.2, unpublished report: MIT Production System Design Group.

COCHRAN, D. S. (1994). *The design and control of manufacturing systems.* (Ph. D. Thesis), Auburn University.

COCHRAN, D. S., Eversheim, W., Kubin, G., y Sesterhenn, M. L. (2000). The application of axiomatic design and lean management principles in the scope of production system segmentation. *International Journal of Production Research, 38*(6), 1377-1396. doi: http://doi.org/10.1080/002075400188906.

CHRYSSOLOURIS, G. (1992). *Manufacturing systems: theory and practice*. New York: Springer Science.

DURMUSOGLU, M. B., Kulak, O. (2008). A methodology for the design of office cells using axiomatic design principles. *Omega International Journal of Management Science*, 633-652.

HAM, I., Hitomi, K., y Yoshida, T. (1985). *Group technology: applications to production management*: Springer Netherlands.

HOUSHMAND, M., y Jamshidnezhad, B. (2006). An extended model of design process of lean production systems by means of process variables. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22*(1), 1-16. doi: http:/doi.org/10.1016/j.rcim.2005.01.004.

KULAK, O., Durmusoglu, M. B., y Tufekci, S. (2005). A complete cellular manufacturing system design methodology based on axiomatic design principles. *Computers & Industrial Engineering, 48*(4), 765-787. doi: http:/doi.org/10.1016/j.cie.2004.12.006.

MARCA, D., A., y McGowan, C. L. (1993). *IDEF0 Sadt business process & enterprise modelling*. San Diego, CA: Eclectic Solutions Corporation

NAKAO, M., Kobayashi, N., Hamada, K., Totsuka, T., y Yamada, S. (2007). Decoupling executions in navigating manufacturing processes for shortening lead time and its implementation to an unmanned machine shop. *CIRP Annals Manufacturing Technology, 56*(1), 171-174. doi: http://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.041.

RAO, RV. (2007). Decision making in the manufacturing environment. Using graph theory and fuzzy mutiple attribute decision making methods. *Springer Series in Advanced Manufacturing*, Springer, 1-2.

SCHNETZLER, M. J., Sennheiser, A., y Schönsleben, P. (2007). A decomposition-based approach for the development of a supply chain strategy. *International Journal of Production Economics, 105*(1), 21-42. doi: http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.02.004.

SOHLENIUS, G. (1998). The productivity of manufacturing through manufacturing system design: *KTH working paper.*

SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

SUH, N. P. (1995). Design and operation of large systems. *Journal of Manufacturing Systems, 14*(3), 203-213. doi: http://doi.org/10.1016/02786125(95)98887-C.

SUH, N. P. (1997). *Is there any relationship between design science and natural science?* Paper presented at the Ho-Am Prize Memorial Lecture, Seoul National University.

SUH, N. P. (2001). *Axiomatic design: advances and applications*: Oxford University Press.

SUH, N. P., Cochran, D. S., y Lima, P. C. (1998). Manufacturing system design. *CIRP Annals Manufacturing Technology, 47*(2), 627-639. doi: http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63245-4.

THIELMAN, J., y Ge, P. (2006). Applying axiomatic design theory to the evaluation and optimization of large-scale engineering systems. *Journal of Engineering Design, 17*(1), 1-16. doi: http://doi.org/10.1080/09544820500287722.

VAN Brussel, H., Peng, Y., y Valckenaers, P. (1993). Modelling flexible manufacturing systems based on Petri nets. *CIRP Annals Manufacturing Technology, 42*(1), 479-484. doi: http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62490-1.

WU, B. (1992). *Manufacturing systems design and analysis* (2nd ed.). London: Chapman & Hall.

YIEN, J. T. (1998). *Manufacturing system design methodology.* (Ph. D. Thesis), University of Science and Technology.

# 7. DISEÑO AXIOMÁTICO EN SISTEMAS DE CALIDAD

## INTRODUCCIÓN

Distintos conceptos de calidad han surgido a través del tiempo; entre los más utilizados en la industria y en la literatura está el dado por Bergman y Klefsjö (1994), basado en el vocabulario de términos de calidad del ISO 8402, así como el de Sage (1995). El primero establece que calidad es el total de características de un producto o servicio que ayudan a satisfacer las necesidades establecidas por los clientes; para el segundo, la calidad es aquello que satisface y excede las necesidades y deseos del cliente. En ambas, el cliente es elemento fundamental para definir la calidad de un producto o servicio.

Con respecto a una organización, el concepto de calidad puede entenderse mejor a partir del concepto 'sistema de calidad'. Por su parte, Bergman y Klefsjö (1994) se refieren a la configuración organizacional, las mediciones, los procesos y el capital vital para llevar a cabo la administración de la calidad. Tales elementos constituyen la manera de controlar y mejorar la calidad de los procesos y productos en una compañía.

En la tabla 7.1, Sage (1995) distingue los sistemas de calidad.

Tabla 7.1. Los sistemas de calidad. Fuente: Oyebode, 2004.

| Sistema | Características clave |
|---|---|
| Control de calidad (QC, *Quality Control* por sus siglas en inglés). Técnicas utilizadas para verificar la calidad de un producto. | Inspección y detección de productos que no cumplen con los estándares; la inspección tiene lugar después del evento; la inspección es efectuada por personal entrenado. |
| Aseguramiento de la calidad (*Quality Assurance*, QA)<br>Acciones planeadas y sistemáticas necesarias para asegurar que el producto o servicio cumpla con los estándares de calidad establecidos. | Se efectúa antes, durante y después del evento y su objetivo es prevenir la falla. Sus preceptos son “hacerlo bien la primera vez”; “la responsabilidad de mantener buenas prácticas para el desarrollo de la calidad en todas las etapas del proceso es de todos”. |
| Administración total de la calidad (*Total Quality Management*, TQM) Mejoramiento continuo. | Difundir la administración total de la calidad mediante la creación de una cultura de calidad cuyo objetivo es satisfacer a los clientes; esto conduce al mejoramiento continuo. |

La investigación en los campos del diseño y la manufactura, incluso en el desarrollo de productos, se ha incrementado y enfocado en apoyar los esfuerzos de la industria en acortar tiempos de entrega, reducir los costos de manufactura y desarrollo de nuevos productos, disminuir costos totales del ciclo de vida de los productos y sistemas, así como mejorar su calidad. Para Fredrikson (1994) y El-Haik (2005), el 80% de los costos totales y la calidad de productos y sistemas se determina en las etapas tempranas del diseño y desarrollo de los mismos. Las metodologías y teorías que contribuyan a mejorar al intervenir en estas etapas tienen un fuerte impacto en la industria; entre ellas se encuentra el DA.

Para Suh (1995), un producto puede considerarse de calidad cuando satisface los RF o especificaciones de diseño que han sido establecidos en términos de un valor nominal y una tolerancia. Tales RF derivan de las necesidades de los clientes.

Existen diversas formas de construir la calidad de un producto. La meta es diseñarlo para que su manufactura sea fácil y cumplir con los RF dentro de las tolerancias y costo especificados. Para elaborar productos de alta calidad se requiere diseñar tanto buenos productos como buenos procesos de manufactura, como se discutió en el capítulo anterior. En el contexto de calidad, se utilizó el término *robusto* para caracterizar aquellos diseños que garantizan la manufactura de un producto de calidad. Asimismo, en el contexto de DA para la calidad (*Axiomatic Quality*, AQ, por sus siglas en inglés) propuesto por El-Haik (2005), la calidad puede definirse como el grado con el cual las vulnerabilidades del diseño no afectan negativamente el desempeño del producto.

Las más importantes vulnerabilidades del diseño se categorizan de la siguiente manera:

– Vulnerabilidad conceptual (*Conceptual Vulnerabilities*, VC), derivadas de la violación de los principios de diseño.

– Vulnerabilidad operacional (*Operational Vulnerabilities*, VO)**,** creadas por el efecto de factores que están fuera del control del diseñador; también son denominados *factores de ruido*. Estos factores son la causa de que ciertas características funcionales del producto o proceso incumplan los valores o especificaciones requeridas; su control es extremadamente costoso y difícil, si no es que imposible.

Esta vulnerabilidad se trató por largo tiempo por la metodología de diseño robusto propuesta por Taguchi, Elsayed, y Hsiang (1989).

La VC siempre dará como resultado vo, pero no viceversa. Es decir, es posible que un diseño que cumpla cabalmente con los principios de diseño pueda ser operacionalmente vulnerable. Este hecho se debe principalmente a que tal vulnerabilidad no fue detectada durante el desarrollo del producto por diversas causas, como falta de comprensión de los principios de diseño, ausencia de una práctica sistémica compatible para encontrar soluciones ideales, presión de las fechas límites de entrega y restricciones de presupuesto (El-Haik, 2005). Generalmente, este tipo de vulnerabilidad puede ser manejada por métodos tradicionales de calidad. Sin embargo, estos generalmente consisten en un interminable ciclo de diseño-prueba-corrección-prueba, que comúnmente se conoce como “apagafuegos”. Las compañías con estas prácticas tienen altos costos de desarrollo, niveles bajos de calidad, largos periodos de entrega de sus productos al mercado, y se mantienen marginalmente competitivas.

## OBJETIVOS DE DISEÑO AXIOMÁTICO EN SISTEMAS DE CALIDAD (AXIOMATIC QUALITY)

Los principales objetivos del Diseño Axiomático en sistemas de calidad que se resumen en la obra de El-Haik (2005) son:

– Reducir las vulnerabilidades del diseño integrando métodos de mejoramiento de la calidad y DA en un marco conceptual titulado “fase de diseño conceptual para capacidad de proceso”. Esta fase está dirigida hacia la reducción del acoplamiento y la vulnerabilidad del diseño conceptual.

– Reducir las vulnerabilidades del diseño en términos de parámetros mensurables de DA, pérdidas por calidad y costos de control para los Requerimientos Funcionales del sistema.

Los objetivos del proceso axiomático en sistemas de calidad podrán alcanzarse cuando los PD y VP se ajusten para:

– Reducir el acoplamiento

– Reducir la complejidad mediante la reducción de la variabilidad de los RF y alcanzar ambos objetivos al menor costo posible

Dentro del marco de DA en procesos de calidad se establece un vínculo entre diseño para ingeniería y los métodos de calidad a través de relaciones que pueden tratarse matemáticamente para reducir las vulnerabilidades de los sistemas de calidad.

## RELACIÓN ENTRE DISEÑO AXIOMÁTICO, DISEÑO PARA SEIS SIGMA Y DISEÑO ROBUSTO

Para El-Haik (2005), el proceso de DA para la calidad consta de tres ingredientes, y representa la intersección que constituye el elemento común entre diseño para Seis Sigma (DPSS), Diseño Axiomático, (DA) y diseño robusto (DR). El éxito de estas tres metodologías ha generado gran interés en el mundo de la ingeniería por ser iniciativas que tratan de sistematizar el proceso de diseño y tienen carácter prescriptivo. Sin embargo, el proceso de DA en sistemas de calidad tiene como fortaleza utilizar la experiencia del diseño robusto para resolver las vulnerabilidades operacionales que no fueron resueltas en el diseño conceptual del producto (ver figura 7.1).

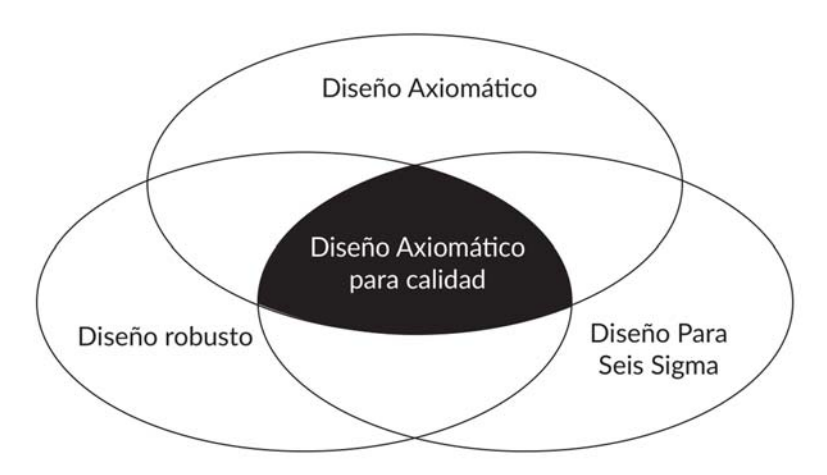



Figura 7.1. Ingredientes del proceso de Diseño Axiomático para la calidad. Fuente: El-Haik, 2005.

El DA para sistemas de calidad está fuertemente alineado con la esencia de Diseño Para Seis Sigma, se enfoca en el diseño del producto o sistema e impulsa a hacer las cosas bien la primera vez. Esto implica conseguir la excelencia absoluta en el diseño, así como en el producto, el proceso de manufactura, el servicio y la comercialización. Es posible que la implementación de DA para sistemas calidad pueda llegar a requerir mayor esfuerzo y entrenamiento que otros métodos, pero tendrá la garantía que ofrece el cumplir con los principios de diseño y axiomas que ayudará obtener un mejor producto en todos los sentidos. Lo anterior es el objetivo de todo sistema de calidad: cumplir con los requerimientos de calidad de sus productos para satisfacción de sus clientes. Para ello, la meta a cumplir de todos los requerimientos en estos sistemas es contener seis veces la desviación estándar entre el valor nominal y cada lado de los límites de especificación. Este es el concepto llamado Seis Sigma (6σ), donde sigma representa la desviación estándar como la medida de variación estadística.

A partir de los axiomas propuestos por DA y aplicados en los procesos de calidad, el axioma de independencia puede tratar con las vulnerabilidades conceptuales del diseño. Por otro lado, el axioma de información puede hacerlo con la vulnerabilidad operacional del diseño. Tal vulnerabilidad usualmente puede ser minimizada, pero no totalmente eliminada. Para Myers y Montgomery (1995), Montgomery (1996) y Tennant (2001), la calidad mejora cuando la variación del producto y del proceso de producción se reduce. Minimizarla implica reducir la variación de los Requerimientos Funcionales del diseño y ajustar su desempeño promedio a las especificaciones deseadas, que es la meta final en el concepto Seis Sigma.

Las actividades dedicadas a ello también ayudarán a reducir el contenido de información, una medida de la complejidad del diseño de acuerdo con el axioma de información. El contenido de información

está relacionado con la probabilidad de éxito en la manufactura de un diseño acorde con lo requerido por el cliente.

El proceso de diseño involucra el mapeo entre los cuatro dominios de DA que ya se han dado a conocer en este libro; sin embargo, El-Haik (2005), propone la utilización de métodos de calidad para facilitar el mapeo entre de los dominios. Estos se resumen a continuación.

El primer mapeo involucra el dominio del cliente y el dominio funcional, o sea, entre los AC y los RF. Este mapeo es muy importante, ya que conduce a la definición del mínimo conjunto de RF de primer nivel. Esta tarea puede ser realizada mediante el uso del despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment, QFD, por sus siglas en inglés) como lo indica la figura 7.2.

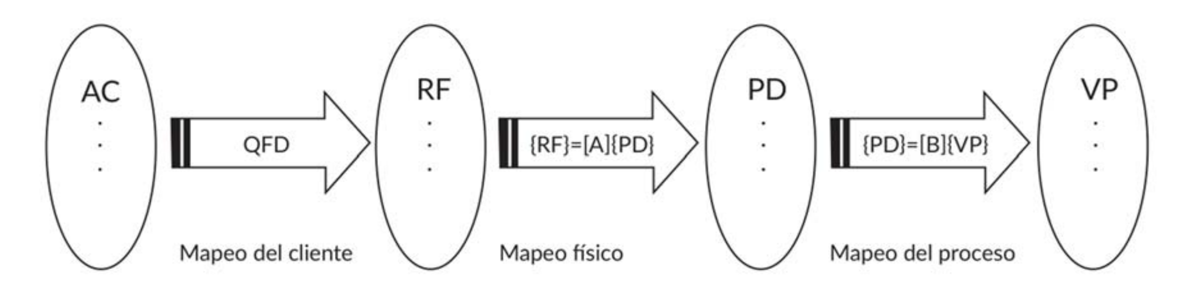



Figura 7.2. Mapeo en el proceso de diseño. El Haik, 2005.

Una vez que se han definido los RF, puede iniciarse el mapeo hacia el dominio físico. Este mapeo involucra el dominio funcional o RF y el dominio físico o los PD. Aquí se establecen las actividades para el desarrollo del producto o sistema y pueden representarse a través de las matrices de diseño. En este mapeo se establece aquel conjunto de RF en el nivel más alto de la jerarquía del diseño, y se continúa así hasta llegar a los niveles más bajos de la jerarquía.

Las matrices de diseño revelan el acoplamiento entre RF y PD que representa la vulnerabilidad conceptual del diseño; también proveen un medio para rastrear la cadena de efectos relacionados con los cambios en el diseño y cómo estos se propagan a lo largo de la estructura del diseño.

El mapeo hacia el dominio de proceso es el último en DA e involucra los PD y las VP. También puede representarse por matrices y provee los elementos del proceso necesarios para traducir los PD a VP en los dominios de manufactura y producción.

En las próximas secciones se describen los pasos requeridos para que DA se integre en un sistema de calidad como DPSS.

## PASOS PARA INTEGRAR DISEÑO AXIOMÁTICO EN EL DISEÑO PARA SEIS SIGMA

Para Dickinson (2006), el proceso de seis sigma implica las siguientes acciones que se distinguen en las siglas IDDOV: Identifica, Define, Desarrolla, Optimiza, Verifica o su similar ICOV: Identifica, Caracteriza, Optimiza y Valida. Mediante estos procesos se intenta estructurar un camino a seguir por los diseñadores y practicantes independientemente del producto del que se trate. La figura 7.3 explica el algoritmo IDDOV propuesto y relaciona cada paso con las metodologías auxiliares en estas acciones.

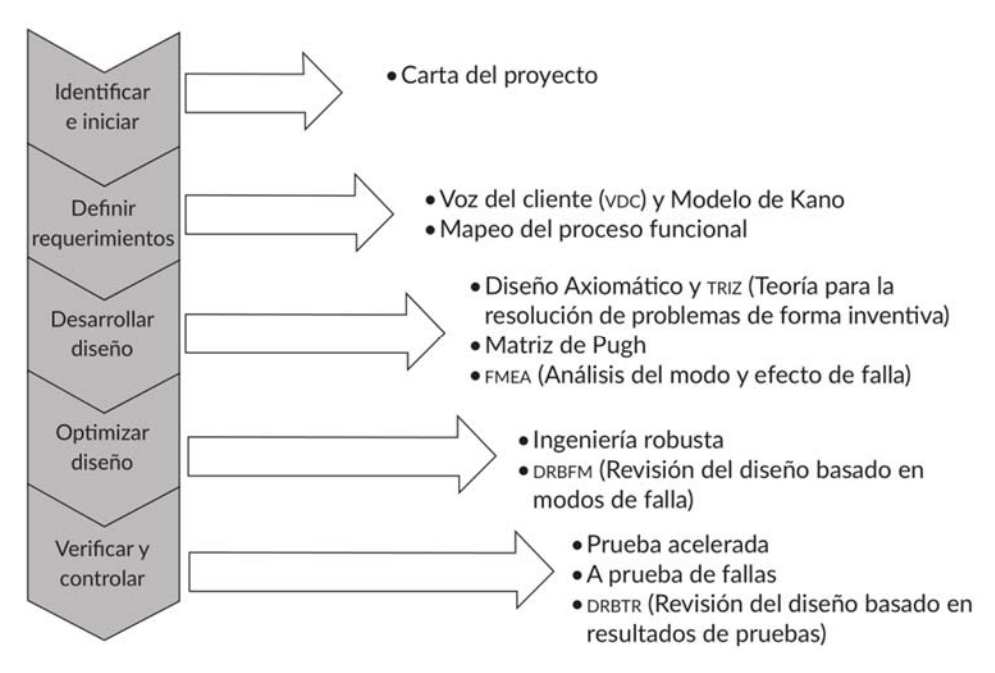



Figura 7.3. Proceso de DPSS: IDDOV. Dickinson, 2006.

Además, Dickinson define las tres primeras acciones (IDD) de la etapa que consiste en "concebir el producto correcto" (*get the right product*); en esta acción, el DA juega un papel esencial y requiere que todo ingeniero se entrene en esta metodología. Las siguientes acciones (OV) forman la etapa "hacer bien el producto"; en estas acciones, se pretende optimizar el producto para que sea robusto y anticiparse a los modos de falla. La metodología de Taguchi juega un papel muy importante en esta etapa. La figura 7.4 muestra las etapas mencionadas anteriormente.

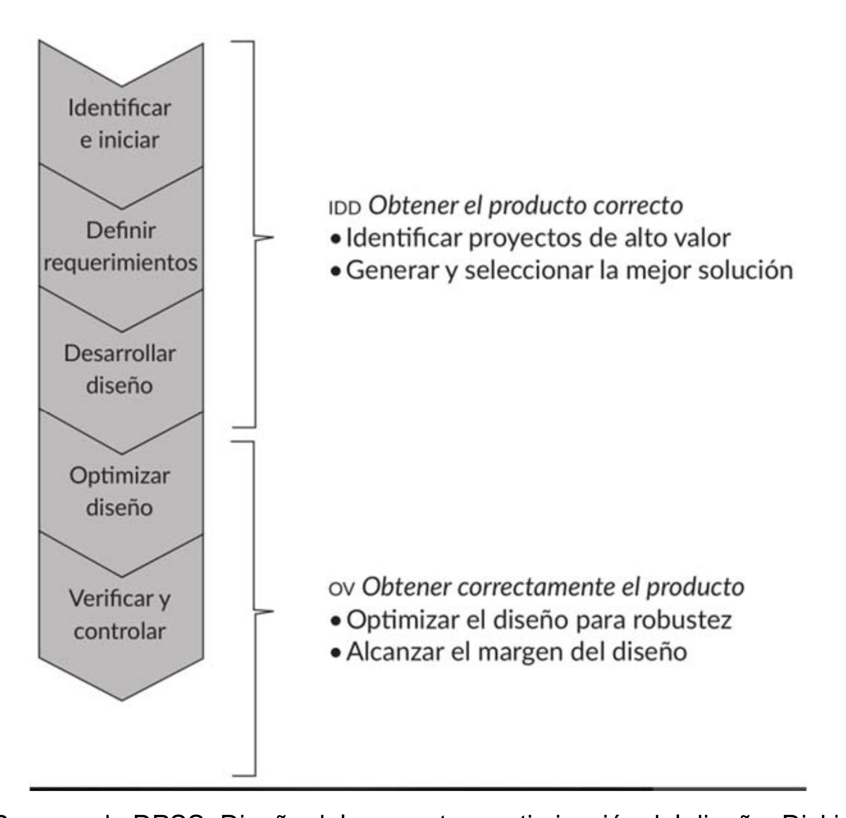



Figura 7.4. Proceso de DPSS: Diseño del concepto y optimización del diseño. Dickinson, 2006.

## Despliegue del Diseño Axiomático en Diseño Para Seis Sigma en una organización

Tan importantes son los aspectos técnicos de la metodología de DA como contar con un programa estructurado para su implementación en la organización dentro del diseño para Seis Sigma. Por lo tanto, Dickinson (2006) ha propuesto cinco pasos que deben seguirse con este propósito. Estos pasos son:

Paso 1. Encontrar las habilidades y experiencia adecuadas.

Paso 2. Obtener soporte de los mandos superiores.

Paso 3. Correr una prueba piloto.

Paso 4. Integrar DA en un programa existente.

Paso 5. Establecer la autosuficiencia del proceso.

La descripción de estos pasos se presenta en los párrafos siguientes.

### Paso 1. Encontrar las habilidades y experiencia adecuadas

La manera más exitosa de realizar este paso es a través del entrenamiento de los ingenieros por personas experimentadas. Esto puede requerir una alta inversión, pero a su vez se consiguen los siguientes beneficios:

- *Alto grado de entusiasmo.* Los ingenieros son entrenados para ser cautelosos, así que un experto con excelente conocimiento sobre las vastas aplicaciones fincará credibilidad y promoverá el entusiasmo.
- *Alta probabilidad de tener una aplicación exitosa*. Es importante observar beneficios en un corto plazo para mantener el entusiasmo. Una práctica efectiva ha sido que el entrenamiento se transforme en consultoría para la implementación del método en un proyecto importante de las compañías, asegurando el éxito del mismo.

### Paso 2. Obtener soporte de los mandos superiores

Este paso se considera crucial en la implementación de DA. Está demostrado ampliamente que obtener el apoyo de los mandos superiores es uno de los elementos más importantes para que cualquier iniciativa de cambio pueda concretarse y perdurar en una compañía (Eckes, 2001; Harry y Schroeder, 2000; Kotter, 1996; Pande, Neuman, y Cavanagh, 2000). Esto quiere decir que altos mandos del área de ingeniería deben formar parte de una serie de actividades, durante las cuales sean informados y estén convencidos de los beneficios del DA en un programa de diseño para Seis Sigma. Aquí, son muy útiles los expertos para apoyar estas actividades.

### Paso 3. Correr una prueba piloto

La prueba piloto basada en un proyecto concreto de la compañía, con una consultoría cercana del experto y los ingenieros responsables, es una excelente vía para el éxito de la implementación y del proyecto mismo. Se recomienda iniciar con la selección de proyectos planteados en un corto plazo, para mantener el entusiasmo al obtener beneficios rápidamente.

La retroalimentación inmediata es fundamental y debe diseñarse un formato ideal para esta prueba. Dickinson (2006), recomienda llevarla a cabo mediante un formato de tipo taller, con una duración de 3-4 días durante los cuales los ingenieros estén inmersos en el proceso de innovación tangible. Así, podrán generarse conceptos para el desarrollo de productos atractivos para el cliente, y que esto conlleve al incremento de la propiedad intelectual y a obtener ventaja competitiva de ello. Además,

recomienda la utilización de herramientas informáticas como el *software* Acclaro®, por ejemplo, y tecnologías de información que puedan asistir el proceso y el método del DA. Estas herramientas facilitarán el entrenamiento y se asegurará el máximo aprovechamiento del mismo. También ayudarán en el proceso de mapeo, en la construcción de matrices de diseño y las iteraciones, entre otras actividades que, al realizarse manualmente, ocuparían demasiado tiempo del taller y podrían generar frustración entre los participantes.

### Paso 4. Integrar DA en un programa existente

Compañías en todo el mundo actualmente hacen esfuerzos e invierten en iniciativas para desarrollar el área de ingeniería con múltiples metodologías y procesos para la mejora continua. Sin embargo, puede ser frustrante su implementación si estas no son elegidas cuidadosamente para que se integren fácilmente a estructuras y programas ya existentes. En el caso del DA, su inclusión dentro de programas como el DPSS puede requerir días adicionales de entrenamiento y una sinergia entre los equipos de trabajo e instructores, así como entre las distintas metodologías utilizadas en DPSS, como QFD, Triz y Análisis Pugh.

### Paso 5. Desarrollo y establecimiento de la autosuficiencia de la compañía

En una compañía grande o mediana es posible que el entrenamiento en DA pueda darse a lo largo de varios años. Por eso, para Dickinson (2006), es importante que se desarrolle un grupo de expertos internos con la suficiente competencia para que pueda entrenar a ingenieros en esta metodología.

Esto no solo implicaría ahorros del entrenamiento externo sino que permitiría la formación de recursos humanos con la experiencia en el método, como multiplicadores en el entrenamiento y en la aplicación del DA. Dentro del programa DPSS se han desarrollado expertos llamados Maestros Cinta Negra (*Masters Black Belt*, su nombre en inglés) que pueden ser entrenados en DA para convertirse en esos expertos internos requeridos en la compañía. Estos pueden mantener un contacto continuo con los expertos externos. Los expertos externos podrían participar para apoyar el desarrollo del DA en la teoría y la práctica y para monitorear la calidad del entrenamiento interno proporcionado.

La medida en que esta autosuficiencia de la compañía pueda desarrollarse depende de los recursos económicos y humanos disponibles. Pueden llevarse a cabo estudios costo-beneficio para evaluar si el entrenamiento interno o el externo es lo que mejor funciona para la empresa. Los cuestionamientos para desarrollar la autosuficiencia en DA en las compañías son los siguientes:

- ¿Quiénes son las personas idóneas para desarrollarse como expertos internos?
- ¿El material didáctico para el entrenamiento estará disponible para su uso interno?
- ¿Cuáles requerimientos son necesarios para entrenar al experto interno?

Esto implica que podría ser necesario que el experto interno practique durante un tiempo con el experto externo y sea sometido a observaciones y evaluaciones periódicas.

En la siguiente sección se presenta una propuesta para integrar el DA en un programa existente de DPSS.

## LA INTEGRACIÓN DEL DISEÑO AXIOMÁTICO CON DPSS

DPSS es, de acuerdo con Arcidiacono, Campatelli, y Citti (2002), una de las metodologías más innovadoras y exitosas que han sido introducidas en la industria en los últimos años. Su meta es la eficiencia del sistema o compañía y la reducción de los costos del proceso de producción. Se vale principalmente de herramientas estadísticas que ayudan estudiar las características del control total de la calidad. Dentro de un proyecto Seis Sigma también es posible la identificación de las causas de no conformancia y sus efectos en el sistema. Se trata entonces de una metodología para optimizar

procesos. Para Dickinson (2006), DPSS es un proceso sistemático para la concepción del diseño de productos robustos que satisfagan las expectativas del cliente. Tal robustez se encuentra en productos cuyo desempeño es insensible a la variación, tanto en el ambiente de manufactura como en el de aplicación.

El DA puede integrarse dentro del DPSS mediante las diversas metodologías con las que DA tiene sinergia. Entre estas, una de las más importantes es el QFD (despliegue de la función de calidad). Esto se debe a que la interacción entre lo que el diseño quiere lograr y cómo puede lograrlo es algo fundamental en DA, y para esto debe desarrollarse el mapeo entre los dominios del cliente, funcional, físico y de proceso. De la misma forma, en DPSS existen procesos que capturan la voz del cliente (VOC, *Voice Of Customer*, por sus siglas en inglés) a través del QFD. El objetivo primordial de esta técnica es convertir esa VOC en la voz del ingeniero (VOE, *Voice Of Engineers*, por sus siglas en inglés) dentro de la metodología denominada "la casa de la calidad" (HOQ, *House Of Quality* por sus siglas en inglés. Esta metodología facilita la comunicación de información clave proveniente del dominio del cliente; traduce esa VOC en los métricos de desempeño requeridos por los ingenieros (VOE); contribuye a comprender las interacciones (positivas o negativas) entre tales métricos, así como las metas de desempeño requeridas, y documenta el desempeño de los competidores. Un ejemplo esquemático de una típica HOQ se presenta en la figura 7.5.

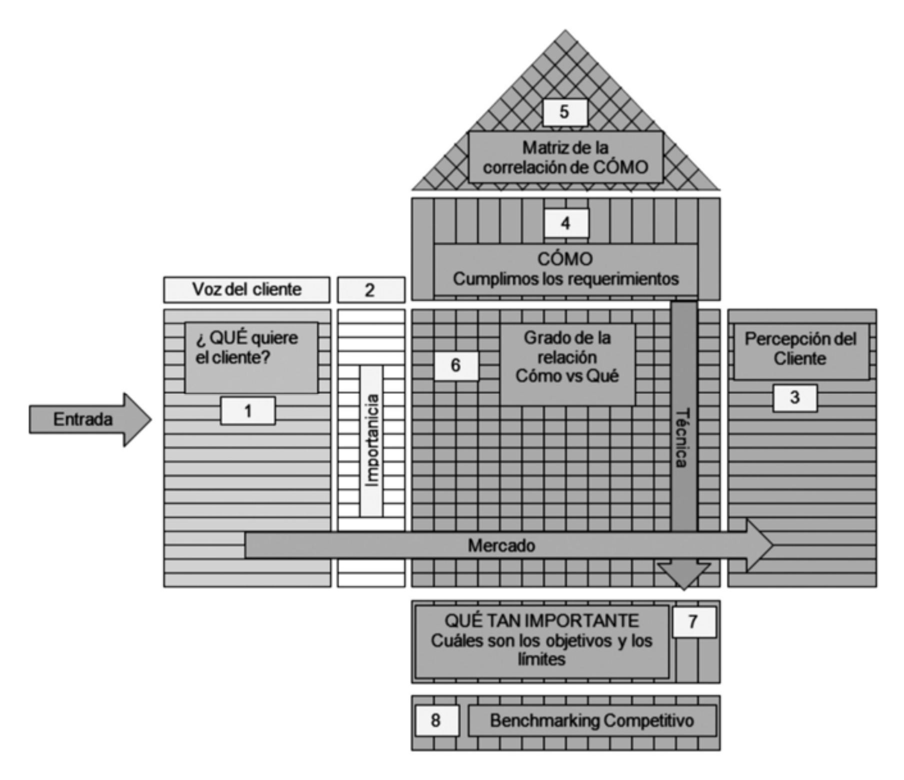



Figura 7.5. Elementos de la casa de calidad del DFC. Dickinson, 2006.

De tal forma, QFD es una de las técnicas más efectivas el mapeo entre el dominio del cliente y el funcional; aquí es precisamente donde se presenta la sinergia con DA. A los ingenieros se les dificulta establecer los RF de sus diseños dentro de un ambiente de solución neutral, y QFD facilita este proceso considerablemente.

Por lo tanto, Yang y El-Haik (2003), resumen la integración de DA y DPSS es la siguiente forma: es una metodología que envuelve las expectativas del cliente y busca satisfacerlas mediante una función de transferencia. Asimismo, predice el desempeño del producto antes de la fase de prueba piloto, construye sistemas de medición del desempeño del mismo mediante un sistema de puntaje o calificaciones (*score cards*) para hacer más efectiva su administración. Además, utiliza un lenguaje común para el diseño, ayuda a efectuar revisiones financieras para asegurar y manejar la viabilidad y contabilidad. Como puede notarse, DPSS pone énfasis en el diseño de los RF; desde el punto de vista axiomático, esto implica su identificación, optimización y verificación mediante la función de

transferencia y el sistema de puntajes o calificaciones (*score cards*). La función de transferencia en su forma más simple es una relación matemática (mapeo) entre los RF y los factores críticos (llamados X o PD). Los Score Cards (sistemas de puntaje o calificación) ayudan en la predicción de los riesgos que se tienen al tratar de alcanzar los RF mediante el monitoreo y el registro de los cambios, así como el comportamiento de la variación observados en los PD.

## RESUMEN

En este capítulo se revisó la importancia que tienen la calidad (satisfacción del cliente) y la intervención del Diseño Axiomático para conseguirla. Integrando el DA en los sistemas de calidad, se pueden organizar y priorizar de mejor manera los Requerimientos Funcionales que sirven para mejorar la calidad de los productos y determinar el estado actual de diseño conforme a los axiomas de DA.

## REFERENCIAS

ARCIDIACONO, G., Campatelli, G., y Citti, P. (2002, June 10-11). *Axiomatic design for Six Sigma.* Paper presented at the Second International Conference on Axiomatic Design Cambridge, MA.

BERGMAN, B., y Klefsjö, B. (1994). *Quality: from customer needs to customer satisfaction* (2nd ed.). Suecia: Studentlitteratur.

DICKINSON, A. L. (2006). *Integrating axiomatic design into a design for Six Sigma deployment.* Paper presented at the 4th International Conference on Axiomatic Design, Florence, Italy.

ECKES, G. (2001). *The Six Sigma revolution: how General Electric and others turned process into profits*. Canada: Wiley.

EL-HAIK, B. (2005). *Axiomatic quality: integrating axiomatic design with six-sigma, reliability, and quality engineering*. New Jersey: Wiley.

FREDRIKSON, B. (1994). *Holistic systems engineering in product development*. Paper presented at the The Saab-Scania Griffin, Saab-Scania, AB, Linkoping, Suecia.

HARRY, M. J., y Schroeder, R. R. (2000). *Six Sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations*. Estados Unidos: Currency.

KOTTER, J. P. (1996). *Leading change*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.

MONTGOMERY, D. C. (1996). *Introduction to statistical quality control*: Wiley.

MYERS, R. H., y Montgomery, D. C. (1995). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*: Wiley.

OYEBODE, A. (2004, December 13-14). *Modularity and quality.* Paper presented at the 2nd seminar on development of modular products, Campus Framtidsdalen, Dalarna University, Sweden.

PANDE, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2000). *The Six Sigma way: how GE, Motorola, and other top companies are honing their performance.* McGraw-Hill Education.

SAGE, J. (1995). *Product development: innovation, design, production quality.* Paper presented at the Association for Science Education, Hatfield. SUH, N. P. (1995). Designing-in of quality through axiomatic design. *Reliability, IEEE Transactions on, 44*(2), 256-264.

TAGUCHI, G., Elsayed, E. A., y Hsiang, T. C. (1989). *Quality engineering in production systems*. New York: McGraw-Hill.

TENNANT, G. (2001). *Six Sigma: SPC and TQM in manufacturing and services*. England: Gower.

YANG, K., y El-Haik, B. (2003). *Design for Six Sigma: a roadmap for product development*: New York: McGraw-Hill.

# 8. DISEÑO AXIOMÁTICO EN ERGONOMÍA

## INTRODUCCIÓN: LA INCURSIÓN DE LA TEORÍA DE DISEÑO AXIOMÁTICO EN ERGONOMÍA

En este capítulo se presenta una reflexión sobre la literatura relacionada con la incursión de la teoría del DA en el campo de la ergonomía. Esta teoría creada por Nam P. Suh, ingeniero mecánico del Instituto Tecnológico de Massachusetts, ha sido aplicada de manera innovadora en el diseño ergonómico de productos y procesos, principalmente.

Este capítulo presenta, primero, aplicaciones de esta teoría en la evaluación del diseño donde se encuentran y describen aquellas más relevantes para este campo. Posteriormente, se aborda el tema de complejidad y su contribución a la ergonomía. Luego se describe la adecuación del axioma de información (Ainf, *Information Axiom,* por sus siglas en inglés) propuesta por Karwowski (2001) para su aplicación en el diseño ergonómico. Finalmente, se explica el enfoque de una nueva subdisciplina de la ergonomía denominada *simbatología,* que estudia la compatibilidad humano-artefacto. Asimismo, algunas conclusiones finalizan este capítulo.

## APLICACIONES DEL DISEÑO AXIOMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO

Suh (2001), reconoce al DA como una teoría y metodología que ha beneficiado a la industria proveyendo bases científicas para mejorar las actividades de diseño y el diseño en sí mismo, integrando un fundamento teórico basado tanto en el pensamiento como en herramientas lógicas y racionales. El DA, agrega Suh, brinda un proceso sistemático de búsqueda a través del diseño para minimizar el proceso azaroso de mejora y así determinar la mejor solución de diseño entre varias alternativas.

Las aplicaciones de DA abordan problemáticas en el diseño de productos, diseño de sistemas y programas computacionales (*software*), de sistemas de calidad, de sistemas de manufactura en relación con sistemas flexibles, y de sistemas en general, según Suh (1995, 1997). Otras aplicaciones incluyen el desarrollo de procesos y productos, diseños estructurales en ingeniería civil –de acuerdo al trabajo de Albano y Suh (1992)– y solución de problemas ambientales, conforme al informe de Wallace y Suh (1993). Estas técnicas aportan la viabilidad para encontrar y definir los criterios de desempeño adecuados para evaluar desde un enfoque ergonómico; determinar sus relaciones y la representación matemática aditiva de los atributos a evaluar; el peso asignado a cada uno y el impacto de las alternativas relacionado con cada atributo como parte fundamental del modelo que se pretende generar.

De esta manera, estos trabajos son de interés desde el aspecto metodológico que siguen, ya que pueden representar formas viables y factibles para el desarrollo de modelos de evaluación desde el enfoque ergonómico. Enseguida, se presenta la sección referente a la teoría de DA y a su incursión, para tratar la evaluación ergonómica en la teoría revisada a partir del estado del arte. Esta inclusión innovadora del DA se encuentra en la frontera del conocimiento en los modelos para la selección y evaluación de diseños de productos, sistemas y procesos, entre otros; por lo tanto, su contenido teórico es relevante.

## APLICACIONES DEL DISEÑO AXIOMÁTICO Y COMPLEJIDAD EN ERGONOMÍA

Como se mencionó anteriormente, las aplicaciones de DA en la evaluación del diseño son innovadoras y también su incursión en la teoría ergonómica; esta sección incluye la revisión de literatura sobre dichas aplicaciones, que contienen el concepto de complejidad.

Con respecto a la complejidad, según Suh (2005) se define como la medida de la incertidumbre para alcanzar un RF específico. La incertidumbre surge a raíz de sistemas pobremente diseñados o del resultado de un sistema incomprensible. Complejidad es una función de la relación entre el rango del diseño y el rango del sistema (dichos rangos son definidos más adelante).

Una de las aplicaciones de la complejidad es el DA. Entre los primeros autores en utilizar DA en ergonomía están Helander y Lin (2002), quienes aseguran que la industria se ha interesado cada vez más en la ergonomía y los factores humanos, sobre todo cuando nuevos sistemas industriales automatizados y productos han fallado debido a que fueron diseñados ignorando las necesidades, capacidades y limitaciones del usuario. La necesidad de contar con atributos cuantitativos y cualitativos sobre aspectos ergonómicos puede ayudar en la selección de alternativas que satisfagan los Requerimientos Funcionales básicos y del usuario.

El DA ha sido utilizado para varias aplicaciones industriales. Por ejemplo, el diseño de un foco de vidrio (Do y Park, 2001), el diseño de partes mecánicas (Finke, Ward, y Smith, 1996), el diseño de ensamblaje mecánico (Hashemian y Gu, 1996; Jung y Billatos, 1993), productos integrados y diseño de procesos (Vallhagen, 1996), diseño estructural (Albano y Suh, 1992) y diseño de confiabilidad en ingeniería (Teng y Ho, 1995). Además, otras aplicaciones han sido documentadas en productos de *hardware*, en el diseño de software y materiales educativos (Kim *et al*., 1991; Tate, 2005) y para el diseño de algoritmos y tareas.

Desde la introducción de DA (Suh, 1990), las publicaciones se han relacionado más con el diseño de varios productos y procesos, sin embargo con Helander y Lin (2002), Wang *et al*. (2009) y Maldonado-Macías *et al.* (2013, 2014) se extiende también para problemas ergonómicos. Para estos autores, el diseño ergonómico considera las capacidades del usuario al igual que sus limitaciones para el diseño de un amplio rango de aplicaciones incluyendo automóviles, aviación, espacio, estaciones de trabajo con computadoras, productos de consumo, interacción humano-computadora, en lo militar, minería, plantas de energía nuclear, seguridad y salud, áreas de trabajo, diseño de estaciones de trabajo, evaluación de tecnología de manufactura avanzada y muchas otras más.

## UTILIZACIÓN DEL AXIOMA DE INFORMACIÓN EN EL DISEÑO ERGONÓMICO

En cuanto al cálculo del contenido de información sobre diseños ergonómicos, Helander y Lin (2002), Wang *et al*. (2009) y Maldonado-Macías (2013, 2014) proponen el uso de rangos de diseño recomendables para una dimensión del producto en particular y uso, como ejemplo una estación de microscopio. En DA, el rango de diseño (RD) se especifica como la tolerancia asociada con el parámetro de diseño (PD) especificado por el diseñador. En casos de estudio, esto podría corresponder, por ejemplo, a los rangos deseables de ajuste basados en las medidas antropométricas. El rango del sistema (RS) se define como la capacidad del sistema actual de manufactura expresado en términos de tolerancia.

Esto corresponde a los rangos de ajuste ofrecidos por los manufactureros. De tal forma, en la extensión propuesta por Helander y Lin (2002) se introdujeron nuevas definiciones de los rangos de información de acuerdo con las siguientes notaciones:

- El rango deseable: es el rango implicado por un EFR (*Ergonomic Functional Requirement*), requerimiento funcional ergonómico. En casos de estudio, el rango deseado se establecería, por ejemplo, como el percentil 5-95 de las medidas antropométricas.
- El rango proveído: es aquel ofrecido por los manufactureros.

- El rango común: es el área común para las dos distribuciones (el cruce del rango proveído y el rango deseable). Aquí, la probabilidad de éxito es *p=rango común/rango deseable*.

Debido a que en DA, la definición del contenido de Información es $I=log_2(1/p)$, entonces el contenido de Información se define de nuevo como (Ecuación 8.1):

$$I = log_2 \frac{Rango\ deseable}{Rango\ Común} \qquad \text{Ecuación 8.1}$$

Complementando la propuesta de Helander y Lin (2002), Karwowski (2005) conceptualizó los dominios de DA para propósitos de diseño ergonómico. Propone que el diseño puede ser definido en general como el mapeo entre capacidades y limitaciones humanas, y los requerimientos del sistema (tecnología ambiente, como se muestra en la figura 8.1, a partir del concepto de requerimiento de compatibilidad y mapeo de compatibilidad entre los dominios de:

- Los requerimientos de ergonomía y factores humanos (*Human Factors and Ergonomics*, HFE), que son los objetivos en términos de necesidades humanas y del sistema
- Los Requerimientos Funcionales y restricciones, expresadas en términos de habilidades y capacidades humanas
- El dominio físico en términos de diseño de compatibilidad, expresado a través de los elementos de interacción humano-sistema y soluciones para el diseño de un sistema de trabajo específico
- El dominio de los procesos, definido como el manejo de la compatibilidad.

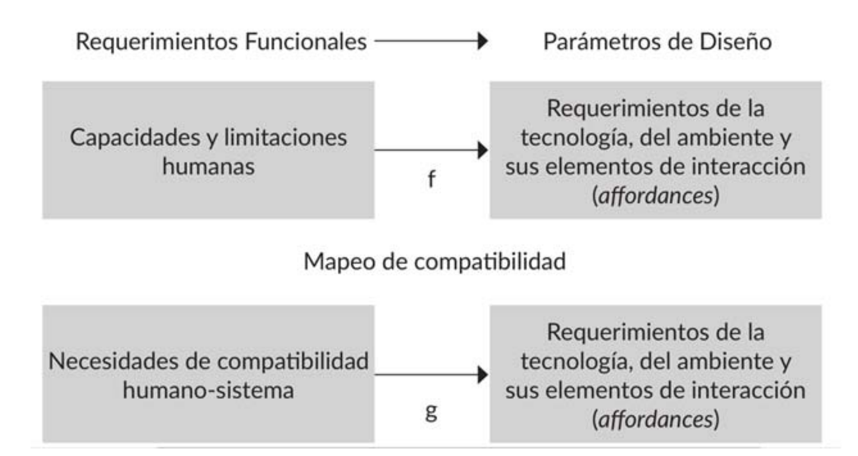



Figura 8.1. Proceso de diseño ergonómico: mapeo de compatibilidad. Karwowski, 2005

El proceso de DA e describe por el proceso de mapeo entre los RF y los PD. La relación entre los dos vectores RF y PD se denota como sigue:

$$\{RF\} = [A]\{PD\} \qquad \text{Ecuación 8.2}$$

Donde [A] es la matriz de diseño que caracteriza al diseño de producto. La matriz de diseño [A] para tres RF y tres PD es:

$$[A] = \begin{pmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{pmatrix} \qquad \text{Ecuación 8.3}$$

La figura 8.2 muestra los cuatro dominios del DA y el mapeo de compatibilidad:

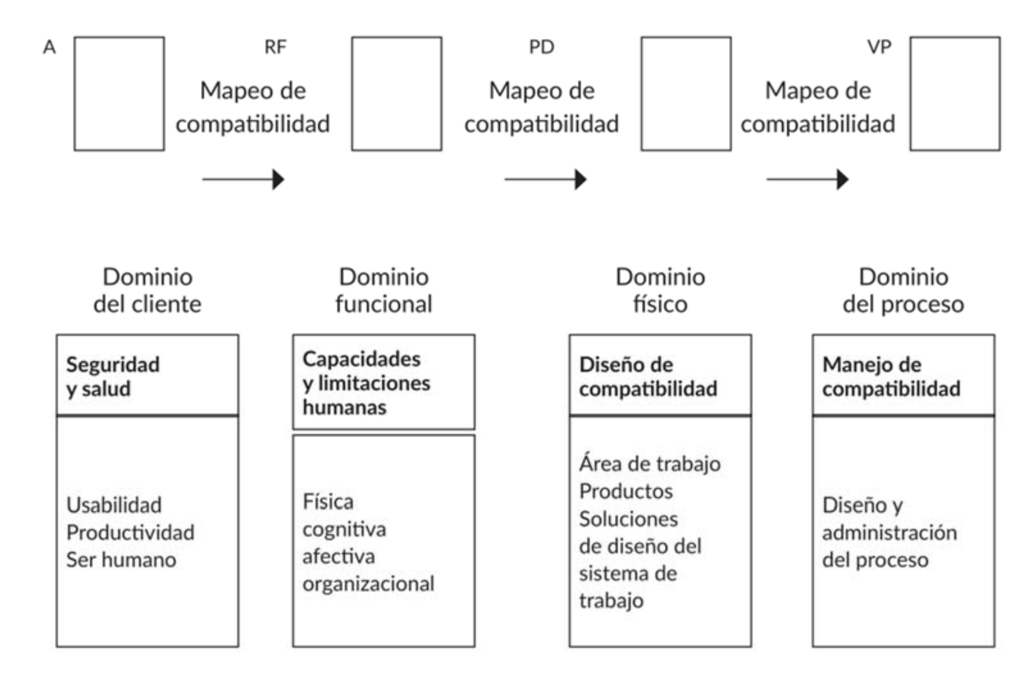



Figura 8.2. Cuatro dominios de la propuesta axiomática en diseño ergonómico. Karwowski, 2005.

Los siguientes dos axiomas de diseño propuestos por Suh (1990) son la base para una metodología formal de diseño.

- Axioma 1: Axioma de independencia. Este axioma estipula una necesidad de independencia entre los RF, los cuales son definidos como el conjunto mínimo de requerimientos independientes que caracterizan el objetivo de diseño definido por los PD.
- Axioma 2: Axioma de información. Este axioma estipula la minimización del contenido de información del diseño. Entre los diseños que satisfagan el axioma de independencia, el diseño con el menor contenido de información es el mejor diseño.

De acuerdo con el segundo axioma de diseño, el contenido de información del diseño debería ser minimizado. El contenido de información *Ii* para un requerimiento funcional de ergonomía (RFE) dado, se define en términos de probabilidad *Pi* para satisfacer RF tal como muestra la ecuación 8.4:

$$I_i = log_2\ (1/P_i) = -log_2 P_i \qquad \text{Bits} \qquad \text{Ecuación 8.4}$$

Estos axiomas pueden adaptarse para propósitos de diseño ergonómico como se replantea en los siguientes enunciados:

- Axioma 1: Axioma de independencia (AI). Este axioma estipula la necesidad de una independencia entre los Requerimientos Funcionales de Compatibilidad (RFC), los cuales se definen como el conjunto mínimo de requerimientos de compatibilidad independientes que caracterizan al objetivo de diseño definido por los Parámetros de Diseño Ergonómico (PDE).
- Axioma 2: Axioma de incompatibilidad humana (Ainf). Este axioma estipula la necesidad de minimizar el contenido de incompatibilidad del diseño. Entre aquellos diseños que satisfagan el axioma de independencia, el que tiene el menor contenido de incompatibilidad es el mejor.

Como Karwowski (2001), señala, en el diseño ergonómico, el axioma 2 se puede interpretar como: el contenido de incompatibilidad ergonómica para el diseño *Ii*, para un ($RFE_i$) dado, se define en términos de la compatibilidad *Ci*, índice de satisfacción del RFEI:

$$I_i = log_2 1/C_i = -log_2 C_i \quad \text{ints}$$ Ecuación 8.5

Donde *I* denota el contenido de incompatibilidad del diseño.

La necesidad de eliminar la incompatibilidad de la relación sistema–humano (o entropía ergonómica) es el principal problema en el diseño ergonómico. El contenido de incompatibilidad del diseño de $I_i$ para un Requerimiento Funcional de Compatibilidad ($RFC_i$) dado, se define en términos del índice de compatibilidad $C_i$ que satisface este $RFC_i$.

Donde: *I* denota el contenido de incompatibilidad de un diseño y el índice de compatibilidad $C_i$ ($0 < C < 1$) se define dependiendo de las metas de diseño específicas.

El proceso matemático que se explica a continuación pretende minimizar la exposición cuando $Ai > R_i$. El índice de compatibilidad $C_i$ se define como el cociente de $R_i/A_i$ donde $R_i$ es el estándar máximo de exposición recomendado para un parámetro de diseño *i* y $A_i$ es el valor actual de este parámetro dado:

$$C_i = R_i/A_i$$ Ecuación 8.6

y de ahí:

$$I_i = -log_2 C_i = -log_2 (R_i/A_i) = log_2(A_i/R_i) \quad \text{ints}$$ Ecuación 8.7

Debe tomarse en cuenta que si $A_i < R_i$, entonces *C* puede tomarse como 1 y el contenido de incompatibilidad $I_i$ es cero.

El criterio del diseño ergonómico para maximizar la adaptabilidad cuando $A_i < R_i$ obtiene de el índice de compatibilidad $C_i$ que se define como el cociente de $A_i / R_i$, donde $R_i$ es el valor deseado del parámetro de diseño *i* y $A_i$ es el valor actual de este parámetro dado.

$$C_i = A_i/R_i$$ Ecuación 8.8

y de ahí

$$I_i = -log_2 C_i = -log_2 (A_i/R_i) = log_2 (R_i/A_i) \quad \text{ints}$$ Ecuación 8.9

Debe tomarse en cuenta que si $A_i < R_i$, entonces *C* puede tomarse como 1 y el contenido de incompatibilidad $I_i$ es cero.

Asimismo, el contenido de la información (I) del diseño se expresa en términos de la incompatibilidad (ergonómica) de los parámetros del diseño con los valores deseados, expresados en términos de PDE, tales como ajustabilidad de la altura de una silla, el peso máximo aceptable para levantar, el número máximo de repeticiones manuales por turno en una línea de producción.

Así, el autor señala que la disciplina de ergonomía y factores humanos se define como la ciencia del diseño, prueba, evaluación y manejo de las interacciones del sistema humano, de acuerdo con los requerimientos de compatibilidad de la relación humano-sistema (Karwowski, 2005).

Aplicaciones similares de esta propuesta en el diseño de estaciones de trabajo de ensamble han sido desarrolladas por Wang *et al*. (2009).

## COMPATIBILIDAD HUMANO-ARTEFACTO. SIMBATOLOGÍA

Karwowski (2001), formó el término simbatología (*Symvatology*) al unir dos palabras griegas: *symvatotis* (compatibilidad) y *logos* (lógica o sobre razonamiento). Este autor la propone como una subdisciplina

de la ergonomía y la propone como la ciencia de la compatibilidad humano-artefacto (sistema). Entre los objetivos de la simbatología están el descubrir las leyes de la compatibilidad humano-artefacto, proponer teorías para la compatibilidad humano-artefacto y desarrollar una matriz cuantitativa para las medidas de tal compatibilidad.

Simbatología es el estudio sistemático (que incluye la teoría, análisis, diseño, implementación y aplicación) de los procesos de interacción que definen, transforman y controlan la compatibilidad de las relaciones entre artefactos (sistemas) y personas. Un sistema-artefacto es definido como un conjunto de todos los artefactos (es decir, objetos hechos por el trabajo humano), así como los elementos naturales del medio ambiente y sus interacciones que ocurren en el tiempo y el espacio que ofrece la naturaleza.

Un sistema humano se define como un ser humano (o humanos) con todas las características (físicas, perceptivas, cognitivas, emocionales, etcétera) que son relevantes para una interacción con el sistema artefacto. El sistema humano de compatibilidad debe considerarse en todos los niveles, incluidos el físico, perceptivo, cognitivo, emocional, social, organizativo, de gestión, ambiental y político. Esto requiere una forma para medir los insumos y productos que caracterizan el conjunto del sistema de interacciones humanas (Karwowski, 1991). El objetivo de cuantificar la compatibilidad humano-artefacto solo se puede lograr si entendemos su naturaleza.

Los objetivos de la simbatología son: observar, identificar, describir, realizar investigaciones empíricas y producir explicaciones teóricas sobre los fenómenos naturales de la compatibilidad humano-artefacto. Como tal, la simbatología debería ayudar a promover el progreso de la ergonomía proporcionando la metodología para el diseño de compatibilidad, así como el diseño de la compatibilidad entre los sistemas artificiales (tecnología) y los seres humanos.

Karwowski y Jamaldin (1995) proponen representar un sistema humano-artefacto como un sistema construido a partir de un subsistema humano, un subsistema artefacto, un subsistema del medio ambiente y un conjunto de interacciones que ocurren entre los diversos elementos de estos subsistemas a través del tiempo.

En el marco anterior, la compatibilidad es un fenómeno natural que se ve afectado por la estructura del sistema humano-artefacto, su complejidad intrínseca y su entropía o el nivel de incompatibilidad entre los elementos del mismo. La compatibilidad debe ser considerada en su relación con la complejidad. La transición de un alto a un bajo nivel de complejidad no conduce necesariamente a un mejor (o más alto) nivel de compatibilidad. A menudo, la mejora de los sistemas humanos, en la mayoría de las relaciones humano-artefacto con respecto a la compatibilidad total del sistema, solo puede lograrse a expensas de un aumento en su complejidad. Lo ideal es lograr un alto nivel de compatibilidad humano-artefacto a un bajo nivel de complejidad.

Para Karwowski (2001), la incompatibilidad ergonómica (EI, por sus siglas en inglés), se define como la degradación de un sistema humano-artefacto, lo cual se refleja en la medible ineficiencia del sistema y en las pérdidas humanas. El principio complejidad-incompatibilidad puede enunciarse de la siguiente manera:

> A medida que la complejidad del sistema humano-artefacto aumenta, la incompatibilidad entre los elementos del sistema también aumenta, y se expresa a través de sus interacciones ergonómicas en todos sus niveles; lo que conduce a una mayor entropía ergonómica (nivel de incompatibilidad ergonómica entre el sistema y sus elementos) y disminuye sus posibilidades para una eficaz intervención ergonómica.

Sobre este principio, Karwowski y Jamaldin (1995), y Norman (1988) afirman que la paradoja de la tecnología es que el añadir funcionalidad a un artefacto viene acompañado de un aumento en la complejidad, lo que se manifiesta en las dificultades encontradas cuando los seres humanos interactúan con los productos de consumo y la tecnología en general. Esta complejidad añadida a menudo incrementa la dificultad y la frustración al interactuar con estos artefactos. Una de las razones es que la tecnología con más características también tiene menos retroalimentación. La complejidad en la

tecnología no puede evitarse cuando se añaden funciones y solo se minimiza con un buen diseño de la misma.

Karwowski y Jamaldin (1995) propusieron una ley, llamada *Ley de la complejidad necesaria*, que establece que la complejidad del diseño solo puede reducir la complejidad del sistema. Esto significa que solamente la complejidad añadida del organismo regulador, expresada por los requisitos de la compatibilidad del sistema, puede ser usada para reducir la entropía del sistema (es decir, reducir en general la incompatibilidad del sistema humano-artefacto).

## RESUMEN

La teoría del DA provee un marco de referencia valioso para guiar a los diseñadores a través del proceso de decisión, con el fin de alcanzar resultados positivos en función del objetivo final del diseño, es decir, proporciona una base teórica fundamentada en la lógica y el raciocinio que nos permite minimizar el costoso proceso iterativo de ensayo y error.

Hasta antes del desarrollo del DA por parte del doctor Suh, la toma de decisiones relacionada con el mejor diseño era particularmente cualitativa, o mejor dicho, subjetiva. El establecimiento del axioma de información dentro de esta metodología ha permitido resolver esta limitante proporcionando una poderosa herramienta para evaluar los diseños de manera más objetiva.

Las aportaciones de Helander (2000), Karwowski (2005), Helander y Lin (2002), Wang *et al*. (2009) y Maldonado-Macías *et al.* (2013, 2014) respecto a la aplicación del DA en ergonomía, parecen ayudar a cambiar la concepción de lo que es un buen o un mal diseño. Estas ideas permiten establecer que al evaluar un diseño se puede adoptar una perspectiva más completa; un buen diseño es más que aquel que funciona correctamente, es decir, aquel en que todos sus componentes realizan una función para la que han sido pensados y creados. También un buen diseño es aquel en el que, además de la funcionalidad de sus componentes, se toma en cuenta a los usuarios que interactúan con el objeto o artefacto diseñado y que tienen una serie de capacidades y limitaciones físicas, cognitivas, afectivas y organizacionales que imponen restricciones que deben ser consideradas e integradas correctamente. La mayor comprensión de estas durante la tarea de diseño ayudará a reducir la incompatibilidad ergonómica o, en otras palabras, disminuir la complejidad del sistema, producto o artefacto.

## REFERENCIAS

ALBANO, L., y Suh, N. (1992). Axiomatic approach to structural design. *Research in Engineering Design, 4*(3), 171-183. doi: http://doi.org/10.1007/BF01607945.

DO, S. H., y Park, G. J. (2001). Application of design axioms for glass bulb design and software development for design automation. *Journal of Mechanical Design, 123*(3), 322-329. doi: http://doi.org/10.1115/1.1372705.

FINKE, R. A., Ward, T. B., y Smith, S. M. (1996). *Creative cognition: theory, research, and applications*: Bradford Book.

HASHEMIAN, M., y Gu, P. (1996, June 19-22). *Representation and retrieval of design knowledge for conceptual mechanical design.* Paper presented at the 3rd CIRP Workshop on Design and Implementation of Intelligent Manufacturing Systems (IMS), Tokyo, Japan.

HELANDER G. Martin, L. L. (2000). Anthropometric design of workstations. First International Conference on Axiomatic Design (pp. 130-138). Cambridge: Institute for Axiomatic Design.

HELANDER, M. G., y Lin, L. (2002). Axiomatic design in ergonomics and an extension of the information axiom. *Journal of Engineering Design, 13*(4), 321-339. doi: http://doi.org/10.1080/09544820210000050794.

JUNG, J. Y., y Billatos, S. B. (1993). An expert system for assembly based on axiomatic design principles. *Journal of Intelligent and Robotic Systems, 8*(2), 245-265.

KARWOWSKI, W. (1991). Complexity, fuzziness, and ergonomic incompatibility issues in the control of dynamic work environments. *Ergonomics, 34*(6), 671-686. doi: http://doi.org/10.1080/00140139108967345.

KARWOWSKI, W. (2001). *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors* (Vol. 3). London: Taylor & Francis.

KARWOWSKI, W. (2005). Ergonomics and human factors: the paradigms for science, engineering, design, technology and management of human-compatible systems. *Ergonomics, 48*(5), 436-463. doi: http://doi.org/10.1080/00140130400029167.

KARWOWSKI, W., y Jamaldin, B. (1995). The science of ergonomics: system interactions, entropy, and ergonomic compatibility measures. En C. Bittner y P. C. Champney (Eds.), *Advances in Industrial Ergonomics and Safety VII* (pp. 121-126). London: Taylor & Francis.

KIM, I.-G., Bae, D.-H., Hong, J.-E., 2007. A component composition model providing dynamic, flexible, and hierarchical composition of components for supporting software evolution. *The Journal of Systems and Software*. doi: http://doi.org/10.1016/j.jss.2007.02.047.

MALDONADO, A., Garcia, J. L., Alvarado, A., y Balderrama, C. O. (2013). A hierarchical fuzzy axiomatic design methodology for ergonomic compatibility evaluation of advanced manufacturing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 171–186.

MALDONADO, A., Garcia, J. L., Alvarado, A., y Balderrama, C. O. (2014). Intuitionistic fuzzy TOPSIS for ergonomic compatibility evaluation of advanced manufacturing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2283–2292.

NORMAN, D. A. (1988). *The design of everyday things*. New York: Doubleday. SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. New York: Oxford University Press.

SUH, N. P. (1995). Designing-in of quality through axiomatic design. *Reliability, IEEE Transactions on, 44*(2), 256-264.

SUH, N. P. (1997). Design of systems. *CIRP Annals Manufacturing Technology, 46*(1), 75-80. doi: http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60779-3.

SUH, N. P. (2001). *Axiomatic Design: advances and applications*: Oxford University Press.

SUH, N. P. (2005). *Complexity: theory and applications*. Nueva York: Oxford University Press.

TATE, D., "Design and creation of web-based educational materials for teaching axiomatic design", Proceedings of the Eighth World Conference on Integrated Design and Process Technology, Society for Design and Process Science, Beijing, China, June 13-17, 2005.

TENG, S. H., y Ho, S. Y. (1995). Reliability analysis for the design of an inflator. *Quality and Reliability Engineering International, 11*(3), 203-214. doi: http://doi.org/10.1002/qre.4680110311.

VALLHAGEN, J. (1996). *An axiomatic approach to integrated product and process development.* (Ph. D.), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Recuperado de http://publications.lib.chalmers.se/publication/1169(1169).

WALLACE, D. R., y Suh, N. P. (1993). Information-based design for environmental problem solving. *CIRP Annals Manufacturing Technology, 42*(1), 175-180. doi: http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62419-6.

WANG, X., Dunbing, T., y Peihuang (2009). An ergonomic assembly workstation design using axiomatic design theory. En S.-Y. Chou, T. Amy, J. Pokojski, y S. Shana, *Global perspective for competitive enterprise, economy and ecology* (pp. 403-412). Londres, Nueva York: Springer.

# 9. DISEÑO AXIOMÁTICO EN SISTEMAS DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

## INTRODUCCIÓN

El diseño de nuevas metodologías de mejora continua del mantenimiento, con el objeto de incrementar los niveles de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos, ha alcanzado un gran interés en los últimos años. Cochran y Reynal (1996), del Instituto Tecnológico de Massachusetts, mostraron cómo, en adición al desarrollo de producto, el DA ha sido aplicado para el diseño de sistemas de manufactura. En este capítulo se muestra cómo su aplicación es extendida al diseño de un sistema de mantenimiento industrial. El diseño de sistema de mantenimiento industrial exitoso debe ser capaz de satisfacer los objetivos estratégicos de una compañía. Existen numerosas herramientas para diseñar sistemas. Los marcos de referencia, sin embargo, no separan los objetivos de los significados. Como resultado de esto, es difícil entender las interacciones entre los diferentes objetivos del diseño y las soluciones, así como el comunicar estas interacciones.

La teoría del DA provee un marco de referencia valioso para guiar a los diseñadores a través del proceso de decisión, con el fin de alcanzar resultados positivos en función del objetivo final del diseño. Durante las últimas tres décadas, el mantenimiento ha cambiado quizá más que cualquier otra disciplina operacional. Los cambios se deben entre otras cosas a un enorme aumento en el número y la variedad de los activos físicos, diseños mucho más complejos, nuevas técnicas del mantenimiento y nuevos puntos de vista sobre las responsabilidades y organización del mantenimiento. La necesidad, cada día más acentuada, por mejorar los estándares en materia de seguridad, ambiente y productividad de las instalaciones y sus procesos, ha obligado a las compañías industriales a incorporar nuevas tecnologías que permitan alcanzar las metas propuestas.

Estos cambios están probando habilidades y actitudes en todas las ramas de la industria hasta el límite. La gente de mantenimiento está teniendo que adoptar totalmente nuevas maneras de actuar y pensar. Al mismo tiempo, las limitaciones de los sistemas del mantenimiento están llegando a ser cada vez más evidentes, sin importar cuán automatizados estén. Frente a esta avalancha de cambios, los profesionales del mantenimiento han estado diseñando y utilizando diversas técnicas o metodologías, buscando alternativas para la mejora del mantenimiento. Cada una de estas metodologías ha buscado cumplir con la función de mejorar el mantenimiento partiendo de diferentes requerimientos para su implementación.

Por ejemplo, manufactura esbelta se define como el conjunto de herramientas para eliminar todas las operaciones que no le agregan valor al producto, servicio y procesos, aumentando el valor de cada actividad realizada y eliminando lo que no se requiere. La filosofía esbelta utiliza el mantenimiento productivo total (MPT), como su herramienta para el mejoramiento del mantenimiento. El MPT es utilizado para dirigir los desperdicios fuera del proceso de manufactura, reduciendo o eliminando los tiempos muertos debidos a las fallas de los equipos. Los elementos clave en el MPT para cumplir con este requerimiento, son la participación de los operarios (mantenimiento autónomo) y la eliminación de los desperdicios (Feld, 2001).

Otras metodologías desarrolladas para la mejora continua del mantenimiento con requerimientos diferentes son:

Mantenimiento basado en el riesgo (MBR): metodología para analizar las prioridades del mantenimiento, basada en el análisis de los riesgos asociados a los activos, el requerimiento clave en la toma de decisión es el riesgo (Jones, 1995).

Mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC): es un método utilizado para determinar las necesidades de mantenimiento de cualquier tipo de activo físico en su entorno de operación, buscando como requerimiento principal el mejoramiento de la confiabilidad; sus elementos para la toma de decisión son la función del equipo, su estándar de desempeño, sus modos de falla, el entorno operacional, así como los efectos y consecuencias de una falla (Amendiola, 1994).

Como se puede ver en los ejemplos anteriores, para la mejora continua del mantenimiento se han desarrollado diversas metodologías con diferentes enfoques, con el fin de cubrir nuevas necesidades, pero cada una de ellas es utilizada, en su mayoría, por separado, donde una excluye a la otra, y no como un sistema integral que persiga el mismo objetivo.

En los capítulos 5 y 6 se explicó cómo el DA es utilizado para el diseño de productos y sistemas de manufactura, y como se mencionó anteriormente, en este capítulo se mostrará su aplicación en el diseño de sistemas de mantenimiento.

## EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

Existe una gran variedad de definiciones diferentes para el concepto de mantenimiento, según los criterios de cada autor. Intentando homogeneizar diferentes criterios, el mantenimiento se define como:

> […] el conjunto de actividades que se realizan sobre un componente, equipo o sistema para asegurar que continúe desempeñando las funciones que se esperan de él, dentro de su contexto operacional, procurando una inversión óptima.

El objetivo fundamental del mantenimiento, por tanto, es preservar la función y la operatividad, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, procurando una inversión óptima de los recursos.

Este enfoque del mantenimiento es resultado de una importante evolución a través del tiempo. Como resultado de esta evolución, se distinguen tres generaciones diferentes de mantenimiento, cada una de las cuales representa las mejores prácticas utilizadas en una época determinada.

### Primera generación

La primera generación comprende el periodo entre 1930 y la Segunda Guerra Mundial. Durante este lapso, la industria estaba poco mecanizada y por lo tanto los tiempos muertos no eran críticos, lo que ocasionaba que el dedicar esfuerzos en la prevención de fallos de equipos no fuera una prioridad. Además, el ser maquinaria muy simple traía como consecuencia que los equipos fueran muy confiables y fáciles de reparar, por lo que no se efectuaban revisiones periódicas, excepto las rutinas de limpieza y lubricación.

El único mantenimiento que se realizaba era el de “reparar cuando falle”, es decir, solo se utilizaba el mantenimiento correctivo.

### Segunda generación

Surgió como una consecuencia de la Segunda Guerra Mundial y provocó un fuerte aumento en la demanda de toda clase de bienes. Este cambio, en conjunto con el gran descenso en la oferta de mano de obra que ocasionó la guerra, aceleró el proceso de mecanización de la industria.

Conforme aumentaba la mecanización, la industria comenzaba a depender de manera crítica del buen funcionamiento de la maquinaria. Esta dependencia provocó que el mantenimiento se centrara en buscar maneras de prevenir los fallos y, por tanto, evitar o reducir los tiempos de pausa forzada de las máquinas. Con este nuevo enfoque del mantenimiento surgió el concepto de mantenimiento preventivo (MP). Además, se comenzaron a implementar sistemas de control y planificación del mantenimiento, o sea, las revisiones a intervalos fijos.

## Tercera generación

Se inició a mediados de la década de los setenta, cuando a raíz del avance tecnológico y de las nuevas investigaciones se aceleraron los cambios. La mecanización y la automatización siguieron aumentando, las demandas de bienes se elevaron, cobraban mucha importancia los tiempos de parada debido a los costos por pérdidas de producción.

Alcanzó mayor complejidad la maquinaria, lo que ocasionó que se incrementara la dependencia de ellas; los requerimientos de productos y servicios de calidad aumentaron, considerando aspectos de seguridad y medio ambiente, se consolidó el desarrollo del MP. Ver figura 9.1.

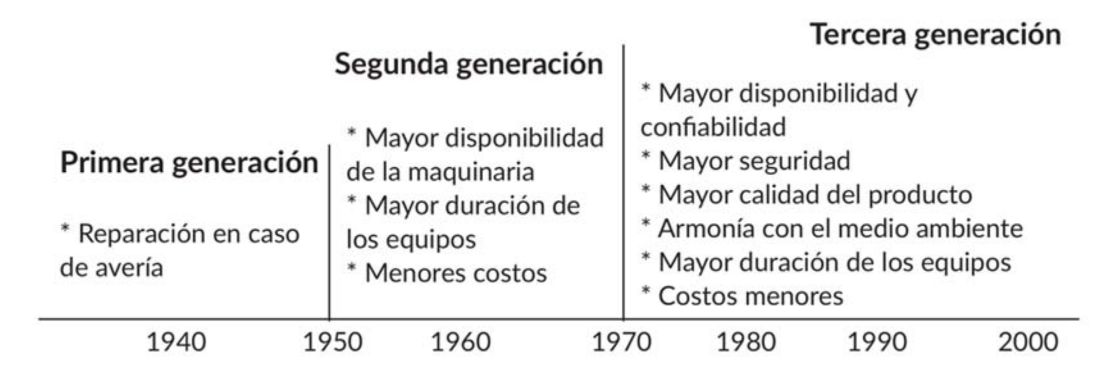



Figura 9.1. Evolución del mantenimiento. Adaptado de Gotera Valbuena Eddin Rafael, 2006.

## Cuarta generación

Con la llegada del nuevo milenio, ha comenzado un crecimiento muy importante de nuevos conceptos de mantenimiento y metodologías aplicadas a la gestión del mantenimiento.

Hasta finales de la década de los 90, los desarrollos alcanzados en la 3ª generación del mantenimiento incluían:

- Herramientas de ayuda para la toma de decisión, como estudios de riesgo, modos de fallo y análisis de causas de fallo.
- Nuevas técnicas de mantenimiento, como el monitoreo de condición.
- Equipos de diseño, dando mucha relevancia a la confiabilidad y mantenibilidad.
- Un cambio importante en pensamiento de la organización hacia la participación, el trabajo en equipo y la flexibilidad.

A estos usos, se han ido añadiendo nuevas tendencias, técnicas y filosofías de mantenimiento hasta nuestros días, de tal forma que actualmente podemos hablar de una cuarta generación del mantenimiento (Dunn, 1998).

El nuevo enfoque se centra en la eliminación de fallos utilizando técnicas proactivas (ver figura 9.2). Ya no basta con eliminar las consecuencias del fallo, sino que se debe encontrar la causa de ese fallo para eliminarlo y evitar así que se repita.

**Objetivos**

* Mayor disponibilidad y fiabilidad
* Mayor seguridad
* Mayor calidad del producto
* Respeto al medio ambiente
* Mayor vida de los equipos
* Eficiencia de costes
* Mayor mantenibilidad
* Patrones de fallos / Eliminación de los fallos

**Técnicas**

* Monitoreo de condición
* Utilización de pequeños y rápidos ordenadores
* Modos de fallo y causa de fallo (FMEA, FMECA)
* Polivalencia y trabajo en equipo / Mantenimiento autónomo
* Estudio de fiabilidad y mantenibilidad durante el proyecto
* Gestión de riesgo
* Sistemas de mejora continua
* Mantenimiento preventivo
* Mantenimiento predictivo
* Mantenimiento proactivo / Eliminación de fallo
* Grupos de mejora y seguimiento de acciones

Figura 9.2. Cuarta generación del mantenimiento. Adaptado de Knezevic Jezdimir, 1996.

Asimismo, existe una preocupación creciente en la importancia de la mantenibilidad y fiabilidad de los equipos, de manera que resulta clave tomar en cuenta estos valores desde la fase de diseño del proyecto. Otro punto importante es la tendencia a implantar sistemas de mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, de la organización y ejecución del mantenimiento.

## MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (MCC)

Como en los últimos años el mantenimiento ha recibido brillantes aportes provenientes del campo de la estadística y de la teoría de la confiabilidad, el mantenimiento de aeronaves ha sido el motor que ha activado los mejores planteamientos dentro del mantenimiento (Moubray, 1997).

Estas teorías también se han ampliado con estudios efectuados en grandes flotas de transporte urbano, aunque no se pueden aplicar a la totalidad de una fábrica u otra empresa debido a la falta de homogeneidad en los equipos instalados, las grandes diferencias entre fábricas y la carencia de organismos que regulen, coordinen y tengan autoridad en lo que respecta a la práctica del mantenimiento. No es que las bases teóricas globales estén vedadas a las fábricas u otras empresas, pero a la vista de la situación general y a la necesidad de atender prioritariamente los problemas inmediatos y de medio plazo, la experiencia es el mejor camino. Ante esta situación, puede ser de primera necesidad el conseguir y seguir un método que pretenda únicamente unificar criterios dentro de una misma organización. Criterios que, como primer caso, se basen en la lógica y el conocimiento de los equipos y de sus misiones. Son los mismos parámetros que se aplican a diario, pero sistematizados para obtener una mayor uniformidad. El plan así diseñado, puede ser un buen punto de partida para que posteriormente sea afinado y retocado con aportaciones de mayor nivel.

Algunos diccionarios definen *mantener* como la causa para continuar o para mantener en un estado existente. Ambas definiciones ponen de manifiesto que el mantenimiento significa la preservación de algo.

Pero, cuando se tiene que tomar la decisión de mantener algo, ¿qué es lo que se desea causar que continúe? ¿Cuál es el estado existente que se desea preservar? La respuesta a estas preguntas puede encontrarse en el hecho de que todo elemento físico se pone en servicio para cumplir una función o funciones específicas. Por lo tanto, cuando se mantiene un equipo, el estado en que se desea preservarlo debe ser aquel en el que se desea que continúe para cumplir la función determinada.

Por *mantenimiento* se entiende el asegurar que todo elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas. Claramente, para que esto sea posible, los equipos deben ser capaces de cumplir esas funciones previstas.

Esto es porque el mantenimiento –el proceso de "causar que continúe"– solamente puede entregar la capacidad incorporada (confiabilidad inherente) de cualquier elemento. No puede aumentarla. En otras palabras, si cualquier tipo de equipo es incapaz de realizar el funcionamiento deseado en principio, el mantenimiento por sí solo no puede realizarlo. En tales casos, debemos modificar los elementos, de forma que pueda realizar el funcionamiento deseado, o por el contrario, reducir nuestras expectativas.

MCC se llama "mantenimiento centrado en la confiabilidad" porque reconoce que el mantenimiento no puede hacer más que asegurar que los elementos físicos continúan consiguiendo su capacidad incorporada y confiabilidad inherentes.

No se puede lograr mayor confiabilidad al interior de los activos y sistemas que la brindada por sus diseñadores. Cada componente tiene su propia y única combinación de modos de falla, con sus propias intensidades de falla.

Cada combinación de componentes es única y las fallas en un componente pueden conducir a fallas en otros componentes. Cada sistema opera en un ambiente único consistente en ubicación, altitud, profundidad, atmósfera, presión, temperatura, humedad, salinidad, exposición a procesar fluidos o productos, velocidad, aceleración, entre otros.

La función determinada de cualquier equipo puede definirse de muchas formas dependiendo exactamente de dónde y cómo se esté usando (el contexto operacional).

Como resultado de esto, cualquier intento de formular o revisar las políticas de mantenimiento debería comenzar con las funciones y los estándares de funcionamiento asociados a cada elemento en su contexto operacional presente. Esto lleva a la siguiente definición formal de MCC: es un proceso que se usa para determinar los requerimientos de mantenimiento de los elementos físicos en su contexto operacional.

Una definición más amplia de MCC podría ser: un proceso que se usa para determinar lo que debe hacerse para asegurar que un elemento físico continúa desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional presente.

## El MCC: siete preguntas básicas

El MCC se centra en la relación entre la organización y los elementos físicos que la componen. Antes de que se pueda explorar esta relación detalladamente, se necesita saber qué tipo de elementos físicos existen en la empresa y decidir cuáles son los que deben estar sujetos al proceso de revisión del MCC. En la mayoría de los casos, esto significa que se debe de realizar un registro de equipos completo si no existe ya uno.

Más adelante, MCC hace una serie de preguntas acerca de cada uno de los elementos seleccionados, como sigue:

- ¿Cuáles son las funciones?
- ¿De qué forma puede fallar?
- ¿Qué causa que falle?
- ¿Qué sucede cuando falla?
- ¿Qué ocurre si falla?
- ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?
- ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?

## Funciones y sus estándares de funcionamiento

Cada elemento de los equipos debe haberse adquirido para unos propósitos determinados. En otras palabras, deberá tener una o más funciones específicas. La pérdida total o parcial de estas funciones afecta a la organización en cierta manera.

La influencia total sobre la organización depende de:

- La función de los equipos en su contexto operacional.
- El comportamiento funcional de los equipos en ese contexto.

Como resultado de esto, el proceso de MCC comienza definiendo las funciones y los estándares de comportamiento funcional asociados a cada elemento de los equipos en su contexto operacional. Cuando se establece el funcionamiento deseado de cada elemento, el MCC pone un gran énfasis en la necesidad de cuantificar los estándares de funcionamiento siempre que sea posible. Estos estándares se extienden a la producción, calidad del producto, servicio al cliente, problemas del medio ambiente, costo operacional y seguridad.

### Fallas funcionales

Una vez que las funciones y los estándares de funcionamiento de cada equipo se hayan definido, el paso siguiente es identificar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones. Esto lleva al concepto de una falla funcional, que se define como la incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado.

## Modos de falla (causas de falla)

El paso siguiente es tratar de identificar los modos de falla que tienen más posibilidad de causar la pérdida de una función. Esto permite comprender exactamente qué es lo que puede que se esté tratando de prevenir. Cuando se está realizando este paso, es importante identificar cuál es la causa origen de cada falla. Esto asegura que no se malgaste el tiempo y el esfuerzo tratando los síntomas en lugar de las causas. Al mismo tiempo, cada modo de falla debe ser considerado en el nivel más apropiado, para asegurar que no se malgasta demasiado tiempo en el análisis de la falla en sí misma.

### Efectos de las fallas

Cuando se identifica cada modo de falla, los efectos de las fallas también deben registrarse (en otras palabras, lo que pasaría si ocurriera). Este paso permite decidir la importancia de cada falla, y por lo tanto, qué nivel de mantenimiento (si lo hubiera) sería necesario. El proceso de contestar solo a las cuatro primeras preguntas produce oportunidades sorprendentes y a menudo muy importantes de mejorar el funcionamiento y la seguridad, y también de eliminar errores. También mejora enormemente los niveles generales de comprensión acerca del funcionamiento de los equipos.

### Consecuencias de las fallas

Una vez que se hayan determinado las funciones, las fallas funcionales, los modos de falla y los efectos de los mismos en cada elemento significativo, el próximo paso en el proceso del MCC es preguntar cómo y (cuánto) importa cada falla. La razón de esto es que las consecuencias de cada falla dicen si se necesita tratar de prevenirlos. Si la respuesta es positiva, también sugieren con qué esfuerzo debemos tratar de encontrar las fallas.

MCC clasifica las consecuencias de las fallas en cuatro grupos:

- Consecuencias de las fallas no evidentes: las fallas que no son evidentes no tienen impacto directo, pero exponen a la organización a otras fallas con consecuencias serias, a menudo catastróficas. Un punto fuerte del MCC es la forma en que trata las fallas que no son evidentes, primero reconociéndolos como tales, en segundo lugar otorgándoles una prioridad muy alta y, finalmente, adoptando un acceso simple, práctico y coherente en relación con su mantenimiento.
- Consecuencias en la seguridad y el medio ambiente: una falla tiene consecuencias sobre la seguridad si puede afectar físicamente a alguien. Tiene consecuencias sobre el medio ambiente si infringe las normas gubernamentales relacionadas con el medio ambiente. MCC considera las repercusiones que cada falla tiene sobre la seguridad y el medio ambiente, y lo hace antes de considerar la cuestión del funcionamiento. Pone a las personas por encima de la problemática de la producción.
- Consecuencias operacionales: una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (capacidad, calidad del producto, servicio al cliente o costos industriales en adición al costo directo de la reparación). Estas consecuencias cuestan dinero, y lo que cuesten sugiere cuánto se necesita gastar en tratar de prevenirlas.
- Consecuencias que no son operacionales: las fallas evidentes que caen dentro de esta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, por lo que el único gasto directo es el de la reparación

Si una falla tiene consecuencias significativas en los términos de cualquiera de estas categorías, es importante tratar de prevenirlas. Por otro lado, si las consecuencias no son significativas, entonces no merece la pena hacer cualquier tipo de mantenimiento sistemático que no sea el de las rutinas básicas de lubricación y servicio.

Por eso, en este punto del proceso del MCC es necesario preguntar si cada falla tiene consecuencias significativas. Si no es así, la decisión normal a falta de ellas es un mantenimiento que no sea sistemático. Si por el contrario fuera así, el paso siguiente sería preguntar qué tareas sistemáticas (si las hubiera) se deben realizar. Sin embargo, el proceso de selección de la tarea no puede ser revisado significativamente sin considerar primero el modo de la falla y su efecto sobre la selección de los diferentes métodos de prevención.

## Definición de falla

La falla puede ser definida como la “disminución o pérdida de la función del componente con respecto a las necesidades de operación que se requieren para un momento determinado”. También puede ser definida como “la incapacidad de cualquier elemento físico de satisfacer un criterio de funcionamiento deseado”. Esta condición puede interrumpir la continuidad o secuencia ordenada de un proceso, donde ocurre una serie de eventos que tienen más de una causa.

Existen dos tipos de falla, las cuales son explicadas a continuación:

- Falla funcional: es la capacidad de cualquier elemento físico de satisfacer un criterio de funcionamiento deseado. Por ejemplo, un equipo deja de funcionar totalmente.
- Fallas parciales (potenciales): se definen como las condiciones físicas identificables que indican que va a ocurrir una falla funcional. Estas fallas están por encima o por debajo de los parámetros identificadospara cada función. Por ejemplo, el elemento no cumple un estándar o parámetro establecido de su servicio.

Las causas de cualquier falla pueden ubicarse en una de estas siete categorías:

- Defectos de diseño.
- Defectos de materiales.

- Manufactura o procesos de fabricación defectuosos.
- Ensamblaje o instalación defectuosos.
- Imprevisiones en las condiciones de servicio
- Mantenimiento deficiente.
- Malas prácticas de operación.

Para identificar y analizar las fallas se requiere de un profundo conocimiento del sistema, las operaciones, el personal y los métodos de trabajo; por lo tanto, es el resultado de un trabajo en equipo.

## Probabilidad de falla

Posibilidad de ocurrencia de un evento en función del número de veces que ha ocurrido para un equipo o familia de equipo en un periodo específico. La representación gráfica de la probabilidad condicional de falla contra la vida útil de los equipos da origen a diferentes modelos de fallas, que serán representativos para una gran variedad de equipos eléctricos y mecánicos.

## Patrones de fallo

Las nuevas investigaciones están cambiando muchas de las tradicionales creencias sobre la relación existente, en una máquina, entre el envejecimiento y el fallo. En particular, se ha demostrado que para muchos equipos existe muy poca relación entre el tiempo de operación y la probabilidad de fallo.

El enfoque inicial del mantenimiento suponía que la probabilidad de que una máquina falle aumenta según el tiempo de operación, siendo mayor la probabilidad de fallo en la "vejez" de la máquina (patrón de fallo A en la figura 9.3).

La segunda generación de mantenimiento introdujo el concepto de "mortalidad infantil". De esta forma, la tasa de fallos de una máquina puede ser representada con una curva de bañera, existiendo, por tanto, más probabilidad de fallo durante el principio y el final de su vida útil (patrón de fallo B en la figura 9.3).

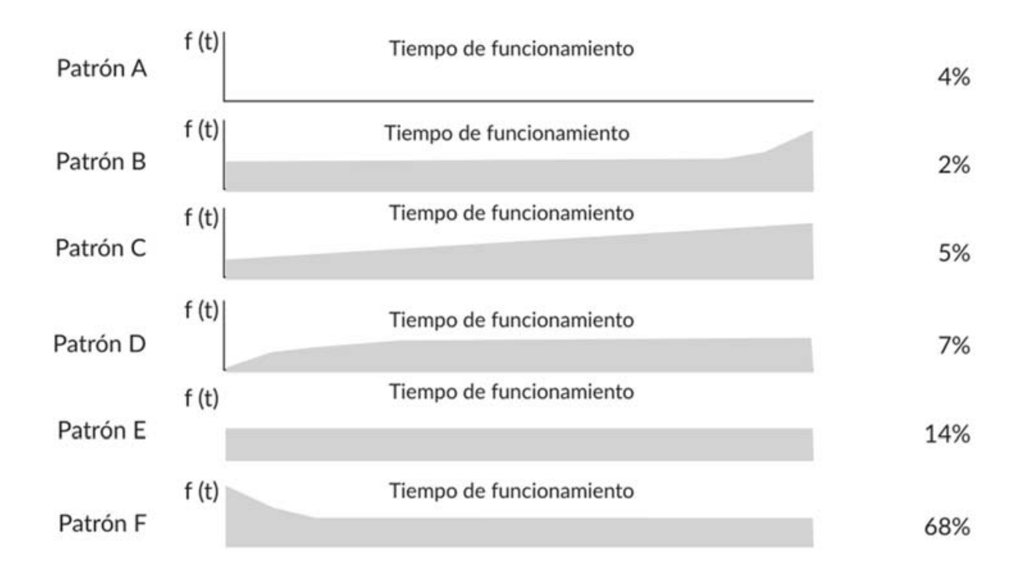



Figura 9.3. Patrones de fallo. Adaptado de Universidad Católica de Chile, sin fecha.

Sin embargo, en el mantenimiento actual se ha demostrado que podemos definir seis patrones diferentes de tasa de fallos, según el tipo de máquina que estemos utilizando. Tener en cuenta el patrón al que se ajusta cada elemento es fundamental si se quiere conseguir una óptima planificación del mantenimiento. Debemos estar seguros de que el mantenimiento que ha sido planificado es el adecuado, ya que de nada sirve realizar el trabajo planificado de manera correcta si este no es el más adecuado.

Para los patrones de fallo A, B y C, la probabilidad de fallo aumenta con la edad hasta alcanzar un punto en el que es conveniente reemplazar el componente antes de que falle y así reducir su probabilidad de fallo. En el caso de los componentes que presentan una probabilidad de fallo del "Patrón E", reemplazar el componente no mejorará en ningún caso su fiabilidad, ya que el nuevo elemento tendrá la misma probabilidad de fallo que el antiguo.

Si el patrón de fallo al que se ajusta el componente es el "F", reemplazar el elemento a intervalos fijos por un componente nuevo no solo no mejorará la fiabilidad, sino que aumentará la probabilidad de fallo, ya que en la "infancia" presenta más mortalidad que en la vejez.

En el gráfico se observa que más del 50 % de los componentes presentan fallos en la "infancia". Esto quiere decir que cada vez que se repara o reemplaza un equipo, las posibilidades de fallo prematuro debido a esa operación de mantenimiento son muy elevadas.

Alguna de las posibles explicaciones que se pueden dar a este hecho, son:

- Errores humanos. La tarea de reemplazo o reparación no se completa de manera adecuada por falta de experiencia o conocimiento del personal de mantenimiento.
- Errores del sistema. El equipo se vuelve a poner en servicio tras haberle realizado una operación de mantenimiento de alto riesgo sin haber revisado dicha operación.
- Errores de diseño. La capacidad de diseño del componente está demasiado cerca del rendimiento que se espera de él, por lo que las piezas de menos calidad pueden fallar cuando se les exige dicho rendimiento.
- Errores de piezas. Se suministran piezas incorrectas o de baja calidad.

Por lo visto anteriormente, está claro que el mantenimiento actual debe centrarse en reducir las operaciones de mantenimiento provocadas por fallos que se ajustan al modelo F. Es decir, fallos ocurridos en la "infancia" de los equipos. Para los elementos que ajusten su tasa de fallos a este patrón F, un mantenimiento planificado a intervalos fijos aumentará las posibilidades de fallo, ya que el equipo nuevo presentará más probabilidad de fallo que el antiguo. Por ese motivo, existe una tendencia generalizada a "mantener lo mínimo posible", debido a que cualquier operación de mantenimiento realizada puede aumentar la probabilidad de fallo.

Otra posibilidad es centrarse en reducir de manera global las probabilidades de fallo sobre todos los modelos. La forma de realizar esto, es mediante la utilización de un mantenimiento proactivo, es decir, buscar la forma de eliminar los fallos, más que eliminar sus consecuencias.

Para eliminar los fallos, hay que eliminar sus causas, lo que implica conocerlas. Existen herramientas, como el "análisis causa-raíz", que ayudan a identificar y eliminar las causas de los fallos, aunque en muchas ocasiones se utiliza como una herramienta reactiva más que proactiva.

La eliminación proactiva de las causas de fallo implica la utilización de metodologías y herramientas que proporcionen lo siguiente:

- Asegurar que los equipos utilizados han sido adecuadamente diseñados para la operación requerida y que a la hora de su adquisición se han tenido en cuenta su mantenibilidad y coste de ciclo de vida, más que minimizar la inversión. Esto requiere una interacción importante entre los ingenieros y el personal de mantenimiento.
- Asegurar que los equipos están operando dentro de sus condiciones de diseño. Esto requiere un aumento en la disciplina del personal de producción a la hora de ajustarse a los estándares, documentos y procedimientos de operación.

- Asegurar un correcto funcionamiento de la gestión de los repuestos e inventarios.
- Asegurar que los procesos de reparación funcionan correctamente, de tal forma que se asegure que los equipos son reparados correctamente a la primera. Esto requiere un alto grado de atención en los detalles y una mayor disciplina en la organización.

## MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL

El Mantenimiento Productivo Total (MPT) es un moderno sistema gerencial de soporte al desarrollo de la industria, que permite, con la participación de todo el personal de la organización, tener equipos de producción siempre listos. Su metodología, soportada por varias técnicas de gestión, establece algunas estrategias adecuadas para mejorar la productividad empresarial con miras a afrontar con éxito y competitividad el proceso de globalización y apertura de la economía.

La filosofía del MPT hace parte del enfoque hacia la calidad total. Mientras la calidad total pasa de hacer énfasis en la inspección y selección al énfasis en la prevención, el MPT pasa del énfasis en la simple reparación al énfasis en la prevención y predicción de las averías y del mantenimiento de las máquinas.

El MPT incluye las cinco metas siguientes:

- Mejora de la eficacia de los equipos.
- Mantenimiento autónomo por operadores.
- Planeación y programación óptima de un sistema preventivo-predictivo.
- Mejoramiento de la habilidad operativa.
- Gestión temprana de equipos, para evitar problemas futuros.

En el MPT, todos los problemas de operación de los equipos se consideran pérdidas de su función, las cuales deben ser monitoreadas y agrupadas en las seis grandes pérdidas:

- Pérdidas por averías.
- Pérdidas de preparación y ajustes.
- Inactividad y paradas menores.
- Pérdidas de velocidad reducida.
- Pérdidas de puesta en marcha.
- Defectos de calidad y repetición de trabajos.

El indicador de gestión clave del MPT es la eficacia global del equipo (OEE) (*Overall Equipment Effectiveness*, por sus siglas en inglés), cuyo valor está definido como el producto de tres factores: la disponibilidad, el rendimiento del ciclo y la tasa de calidad. Los operarios y personal de mantenimiento se capacitan para identificar los problemas relacionados con la eficacia de los equipos y realizar análisis para determinar las pérdidas.

El alcance del MPT ha evolucionado ampliamente desde la década de los años setenta hasta el día de hoy, al punto que se le considera actualmente como un sistema de innovación empresarial, como se muestra en la figura 9.4, sobrepasando los modelos de mejoramiento industrial del final del siglo pasado.

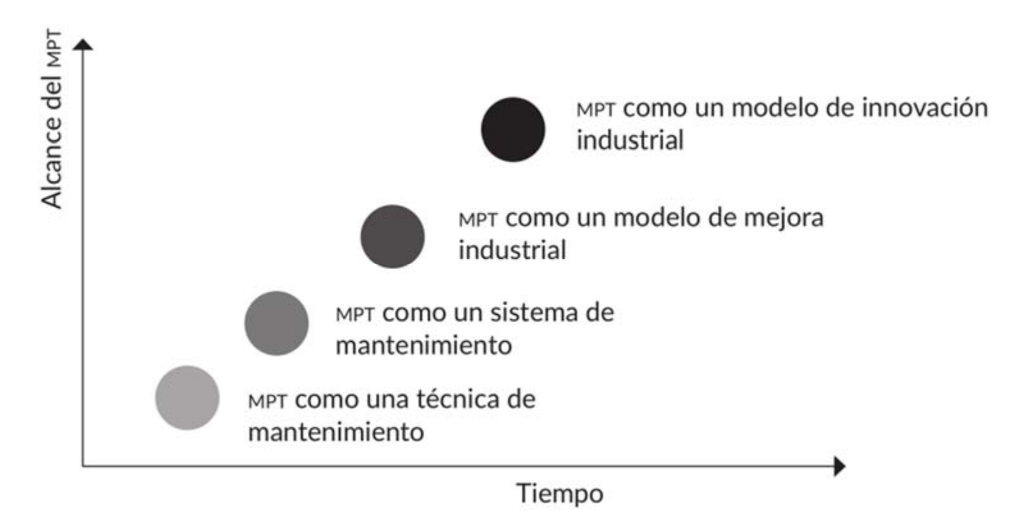



Figura 9.4. Evolución del alcance del MPT. Adaptado de De Los Angeles Chan Yah Rossana, 2013.

Los objetivos que una organización busca al implantar el MPT pueden tener diferentes dimensiones:

- Objetivos estratégicos: el proceso MPT ayuda a construir capacidades competitivas desde las operaciones de la empresa, gracias a su contribución a la mejora de la efectividad de los sistemas productivos, flexibilidad y capacidad de respuesta, reducción de costes operativos y conservación del "conocimiento" industrial.
- Objetivos operativos: el MPT tiene como propósito, en las acciones cotidianas, que los equipos operen sin averías y fallos, eliminar toda clase de pérdidas, mejorar la fiabilidad de los equipos y emplear verdaderamente la capacidad industrial instalada.
- Objetivos organizativos: el MPT busca fortalecer el trabajo en equipo, incrementar la moral en el trabajador, crear un espacio donde cada persona pueda aportar lo mejor de sí. Todo esto, con el propósito de hacer del sitio de trabajo un entorno creativo, seguro, productivo y donde trabajar sea realmente grato.

## Procesos fundamentales MPT (pilares)

Los procesos fundamentales han sido llamados, por el Instituto Japonés de Mantenimiento Industrial (IJMI), "pilares". Estos pilares sirven de apoyo para la construcción de un sistema de producción ordenado. Se implantan siguiendo una metodología disciplinada, potente y efectiva. Los pilares considerados por el IJMI como necesarios para el desarrollo del MPT en una organización son los que se indican a continuación:

- Mejoras enfocadas o Kobetsu Kaizen.
- Mantenimiento autónomo o Jishu Hozen.
- Mantenimiento planificado o progresivo.
- Mantenimiento de calidad o Hinshitsu Hozen.
- Prevención de mantenimiento.
- Entrenamiento y desarrollo de habilidades de operación.

Los procesos fundamentales o "pilares" del MPT se deben combinar durante el proceso de implantación. Debe existir una cierta lógica para la implantación del MPT en la empresa y esta

dependerá del grado de desarrollo que la compañía posea en su función productiva y de mantenimiento en relación con cada uno de los procesos fundamentales. Véase la figura 9.5.

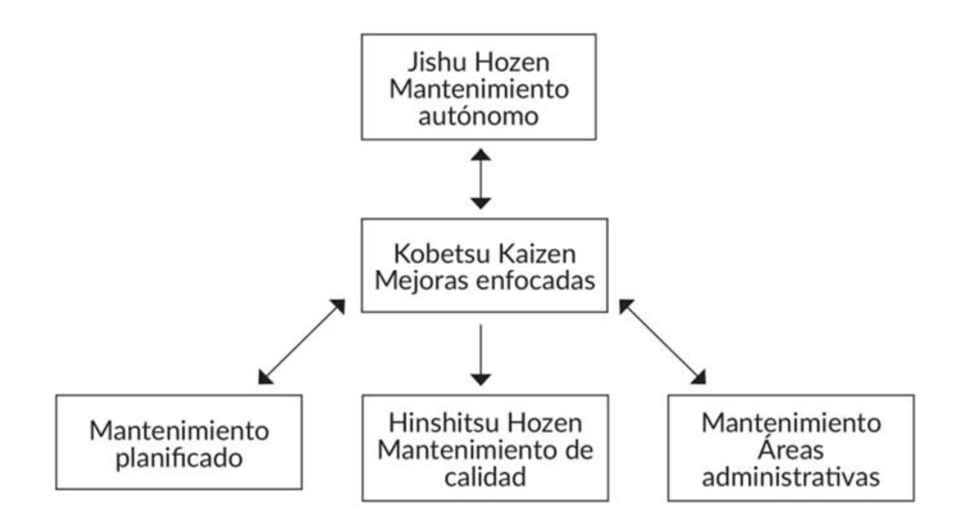



Figura 9.5. Relación entre los pilares del MPT. Fuente: Elaboración propia.

## Efectividad total de los equipos

Dentro de la metodología del MPT se considera que la efectividad total del equipo (*OEE*, por sus siglas en inglés), es indicador clave para medir qué tan efectivo es el mantenimiento. La efectividad total del equipo se mide utilizando tres diferentes parámetros atribuibles a la efectividad de un equipo; estos parámetros o índices son disponibilidad, desempeño e índice de calidad del equipo.

El índice de disponibilidad se mide de la siguiente manera:

$$\frac{TTD-TM}{TTD} \qquad \text{Ecuación 9.1}$$

Donde:

*TTD* = Tiempo total disponible

*TM* = Tiempo muerto

El índice de desempeño se mide:

*TNO* = *TTD* – *TM*

$$\frac{TCI \ x \ PP}{TNO} \qquad \text{Ecuación 9.2}$$

Donde:

*TCI* = Tiempo de ciclo ideal

*PP* = Piezas producidas

*TNO* = Tiempo neto de operación

El índice de calidad se mide de la siguiente manera:

$$\frac{PP - PD}{PP} \qquad \text{Ecuación 9.3}$$

Finalmente, la efectividad total del equipo (*OEE*) se calcula:

$$OEE = Disponibilidad \times Desempeño \times Calidad \times 100$$ Ecuación 9.4

Para calcular la *disponibilidad* se pueden aplicar los pasos que se detallan a continuación:

- Establecer el tiempo base de cálculo o tiempo calendario (TC): es frecuente, en empresas de manufactura, tomar la base de cálculo 1440 minutos o 24 horas. Para empresas de procesos continuos que realizan inspección de planta anual, se considera el tiempo calendario como (365 días * 24 horas).
- Obtener el tiempo total no programado: si una empresa trabaja únicamente dos turnos (16 horas), el tiempo de funcionamiento no programado en un mes será de 240 horas.
- Obtener el tiempo de paradas planificadas: se suma el tiempo utilizado para realizar acciones preventivas de mantenimiento, descansos, reuniones programadas con operarios, reuniones de mejora continua, etcétera.
- Calcular el tiempo de funcionamiento (TF): es el total de tiempo que se espera que el equipo o planta opere. Se obtiene restando del tiempo calendario (TC), el tiempo destinado a mantenimiento planificado (TPP) y tiempo total no programado (TTNP).

$$TF = TC - (TPP + TTNP)$$ Ecuación 9.5

- Cálculo de la disponibilidad: se obtiene dividiendo el *TF* por el *TC*. Representa el porcentaje del tiempo calendario que realmente se utiliza para producir y se expresa en porcentaje:

$$Disponibilidad = (TF/TC) \times 100$$ Ecuación 9.6

- Cálculo del *OEE***:** este indicador muestra las pérdidas reales de los equipos, medidas en tiempo. Este indicador posiblemente es el más importante para conocer el grado de competitividad de una planta industrial.

  Está compuesto por los siguientes tres factores:

  - Disponibilidad: mide las pérdidas de disponibilidad de los equipos debido a paradas no programadas.
  - Eficiencia de rendimiento: mide las pérdidas por rendimiento causadas por el mal funcionamiento del equipo, no funcionamiento a la velocidad y rendimiento original, determinados por el fabricante del equipo o diseño.
  - Índice de calidad: estas pérdidas por calidad representan el tiempo utilizado para producir productos que son defectuosos o tienen problemas de calidad. Este tiempo se pierde, ya que el producto se debe destruir o reprocesar. Si todos los productos son perfectos, no se producen estas pérdidas de tiempo de funcionamiento del equipo.

  El cálculo de la *OEE* se obtiene multiplicando los anteriores tres términos expresados en porcentaje.

$$OEE = Disponibilidad \times Eficiencia \times Índice\ de\ Calidad$$ Ecuación 9.7

Este índice es fundamental para la evaluación del estado general de los equipos, máquinas y plantas industriales. Sirve como medida para observar si las acciones del MPT tienen impacto en la mejora de los resultados de la empresa.

El *OEE* es un índice importante en el proceso de introducción y durante el desarrollo del MPT. Este indicador responde elásticamente a las acciones realizadas, tanto de mantenimiento autónomo como

de otros pilares MPT. Una *OEE* buena medida inicial del *OEE* ayuda a identificar las áreas críticas donde se podría iniciar una experiencia piloto MPT.

Las cifras que componen el *OEE* nos ayudan a orientar el tipo de acciones MPT y la clase de instrumentos que debemos utilizar para el estudio de los problemas y fenómenos. El *OEE* sirve para construir índices comparativos entre plantas para equipos similares o diferentes. Esta información será útil para definir en el tipo de equipo en el que hay que incidir con mayor prioridad con acciones MPT. Algunos directivos de plantas consideran que obtener un valor global *OEE* para un proceso complejo o una planta no es útil del todo, ya que puede combinar múltiples causas que cambian diariamente y el efecto de las acciones MPT no se logran apreciar adecuadamente en el *OEE* global. Por este motivo, es mejor obtener un valor de *OEE* por equipo, con especial atención en aquellos que han sido seleccionados como piloto o modelo.

## MANTENIBILIDAD

La única característica común entre todos los sistemas creados por el hombre es su capacidad para satisfacer una necesidad, desempeñando una función específica. Consecuentemente, la funcionalidad es la característica más importante de cualquier sistema creado por el hombre y está relacionada con su capacidad inherente para desempeñar una función específica.

A pesar de que un sistema sea funcional al comienzo de su vida operativa, todo usuario es completamente consciente de que, independientemente de la perfección del diseño de un sistema, de la tecnología de su producción o de los materiales usados en su fabricación, durante su operación se producirán algunos cambios irreversibles. Estos cambios son resultado de procesos tales como corrosión, abrasión, acumulación de deformaciones, distorsión, sobrecalentamientos, fatiga, difusión de un material en otro, etcétera. A menudo, estos procesos se superponen e interactúan los unos con los otros y causan un cambio en el sistema, como resultado del cual cambiarán sus características de actuación. La desviación de estas características respecto a los valores especificados es considerada un fallo del sistema.

El fallo del sistema puede, por consiguiente, ser definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Independientemente de las razones de su aparición, un fallo causará la transición del sistema desde su estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo.

Por lo tanto, desde el punto de vista de la capacidad para satisfacer las necesidades de acuerdo con las especificaciones establecidas, todos los sistemas creados por el hombre pueden pertenecer a uno de los dos posibles estados.

- Estado de funcionamiento (SoFu).
- Estado de fallo (SoFa).

Para que un sistema recupere la capacidad de realizar una función es necesario realizar tareas de mantenimiento. Es aquí cuando una pregunta importante surge: ¿Cuánto durará la tarea de mantenimiento? Esta pregunta está directamente relacionada con la parte inferior del perfil de funcionabilidad mostrado en la figura 9.6.




Figura 9.6. Duración incierta del tiempo de recuperación. Adaptado de Knezevic Jezdimir, 1996.

El análisis de mantenibilidad proporciona una potente herramienta para la descripción cuantitativa de la capacidad inherente de que un equipo sea recuperado para el servicio, mediante la realización de tareas de mantenimiento.

A pesar de que en la literatura técnica podemos encontrar varias definiciones para la mantenibilidad, la definimos en este texto desde un enfoque basado en el tiempo empleado como “una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada, a lo largo de un periodo de tiempo empleado en el mantenimiento, cuando este se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos” (MIL–STD– 721B, DoD, 1966 USA).

Mantenibilidad se refiere al conjunto de recursos, políticas y actitudes que en un momento dado se ponen a disposición de la práctica del mantenimiento para asegurar que un sistema, componente o plan pueda ser operado cuando se necesita. Esta es una función de mantenibilidad para obtener la disponibilidad. Un sistema puede ser altamente confiable y fallar con baja frecuencia, pero no es posible restablecerlo rápidamente; se dice entonces que su disponibilidad es baja y la mantenibilidad carece de procedimientos e instrucciones que puedan minimizar el tiempo de restablecimiento. A la inversa, si un sistema tiene confiabilidad promedio y puede ser restaurado rápidamente, esta mantenibilidad se amortiguará y su disponibilidad será alta.

Para explicar el significado físico de la mantenibilidad, vamos a establecer el enlace entre una tarea específica de mantenimiento y el tiempo empleado en su realización. Así, la mantenibilidad puede representarse gráficamente como muestra la figura 9.7, donde T representa el tiempo necesario para la acertada finalización de una tarea específica de mantenimiento.

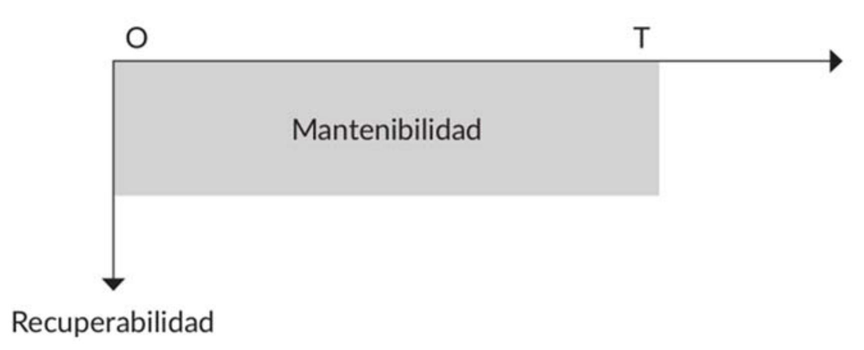



Figura 9.7. El enfoque de la mantenibilidad basado en el tiempo empleado. Adaptado de Knezevic Jezdimir, 1996.

Así, la mantenibilidad podría ser expresada cuantitativamente, mediante el tiempo T empleado en realizar la tarea de mantenimiento especificada en el elemento que se considera, con los recursos de apoyo especificados. La pregunta que surge inmediatamente aquí es: ¿cuál es la naturaleza de T? En otras palabras, ¿es T constante para cada ejecución de la tarea de mantenimiento, o difiere de un ensayo a otro?

Como lo que físicamente existe son copias del elemento en consideración, la tarea de mantenimiento existe solo mediante la ejecución física de las actividades que la componen. Por ello, la respuesta dependerá del tiempo empleado en cada ensayo para la recuperación. A pesar del hecho de que cada tarea de mantenimiento se compone de las actividades específicas que se realizan en una secuencia específica, el tiempo empleado en la ejecución de todos ellos puede diferir de un ensayo a otro.

Hablando en general, si se analiza el tiempo empleado en la recuperación a lo largo de varios ensayos de una tarea de mantenimiento especificada, puede verse que uno de ellos puede ser recuperado en el instante indicado por $b_1$, otro en el instante $b_2$ y, de la misma forma el enésimo será ejecutado en el instante $b_n$, ver figura 9.8.

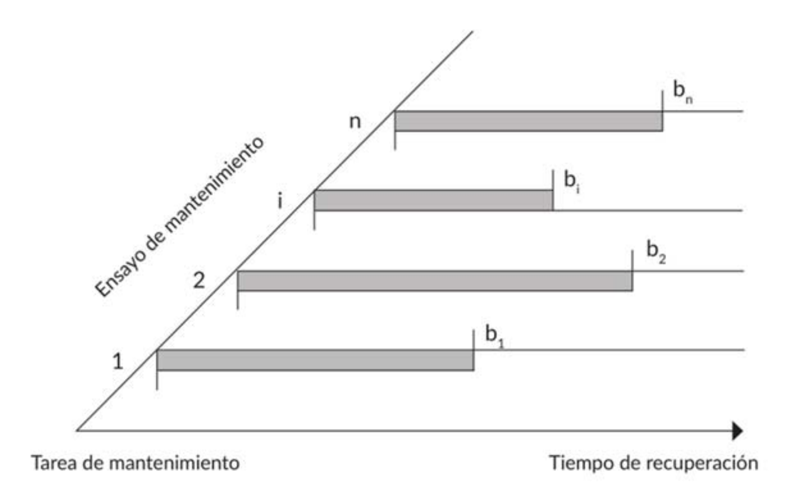



Figura 9.8. Configuración del mantenimiento en varios ensayos de una tarea de mantenimiento específica. Adaptado de Knezevic Jezdimir, 1996.

La pregunta que por supuesto surge es: ¿por qué son necesarios diferentes tiempos para la ejecución de tareas de mantenimiento idénticas?

Para proporcionar la respuesta a esta pregunta es necesario analizar todos los factores que intervienen. Los tres grupos que se dan a continuación son los más influyentes.

- Factores personales, que representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal involucrado.
- Factores condicionales, que representan la influencia del entorno no operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, geométrica y forma del elemento en recuperación.
- Entorno, que representa la influencia de factores como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento ruido, etcétera, en el personal de mantenimiento durante la operación de recuperación.

Consecuentemente, la naturaleza del parámetro T para la tarea de mantenimiento también depende de la variabilidad de esos parámetros.

Por lo tanto, la relación entre los factores influyentes y el parámetro T podría expresarse por la siguiente ecuación:

$$T = f\ (factores\ personales, condicionales\ y\ ambientales) \qquad \text{Ecuación 9.8}$$

Analizando la expresión anterior, puede decirse que, como resultado del elevado número de parámetros en cada grupo y por su variabilidad, es imposible encontrar la regla que describiría de forma determinista esta compleja relación representada por *"f"*. El único camino posible en el análisis de mantenibilidad es recurrir a la teoría de probabilidad, que ofrece una herramienta para la descripción probabilística de la relación definida por la expresión anterior.

En conclusión, podría decirse que es imposible dar una respuesta determinista respecto al instante de tiempo operativo en que se produce la transición del estado de falla al estado de funcionamiento para cualquier ensayo individual de la tarea de mantenimiento en consideración. Solo es posible asignar una cierta probabilidad de que ocurra en un cierto instante de tiempo de mantenimiento, o de que un determinado porcentaje de ensayos sean o no completados antes de un tiempo determinado.

Así, la recuperación de la funcionalidad de un equipo podría ser considerado como un experimento aleatorio y la transición del sistema al estado de funcionamiento como el suceso elemental que corresponde al resultado de ese experimento.

La función que asigna un valor numérico correspondiente a $t_i$ cada suceso elemental $b_i$ del espacio muestral S, es una variable aleatoria, que en este caso se llamará tiempo de recuperación (*Time to Restore*, *TTR*).

Así, la probabilidad de que la variable aleatoria *TTR* tome el valor $t_i$, es:

$$P_i = P\ (TTR = \ t_i\ )$$ Ecuación 9.9

Los valores numéricos tomados por las variables aleatorias y la probabilidad de su realización definen una distribución de probabilidad que puede expresarse por diferentes indicadores. Así, se establece la completa analogía entre el sistema de probabilidad definido en la teoría de probabilidad y la capacidad de un sistema de recuperación.

Aunque el tiempo es la variable real, frecuentemente puede ser más conveniente usar otras variables fácilmente disponibles que representan el tiempo de uso: días, horas, minutos, etcétera.

El objetivo de la discusión anterior era introducir el concepto de mantenibilidad y mostrar que tiene una estrecha relación con la probabilidad, es decir, que utilizando el concepto de sistema de probabilidad, la mantenibilidad del sistema o de sus componentes como característica cualitativa puede ser "traducida" en una medida cuantitativa.

La función de distribución de cualquier variable aleatoria representa la probabilidad de que tenga un valor igual o menor que algún valor particular α, por ejemplo:

$$F\ (a) = P\ (X\ \leq a)$$ Ecuación 9.10

En el concepto de mantenibilidad, la función de distribución de la variable aleatoria *TTR* se llamará Función de Mantenibilidad y se representa por *M (t)*. Indica la probabilidad de que la Funcionabilidad del sistema sea recuperada en el momento especificado de mantenimiento, o antes (tiempo empleado *t*).

$$M\ (t) = P\ (funcionabilidad\ recuperada\ en\ el\ tiempo\ t\ ó\ antes)$$
$$= P\ (TTR\ \ \leq t)$$ Ecuación 9.11

La tabla 9.1 muestra la función de mantenibilidad de varias distribuciones teóricas bien conocidas donde *Am, Bm, Cm*, son los parámetros de escala, forma y origen de la distribución de probabilidad y Φ es la función normal de Laplace, cuyo valor puede encontrarse fácilmente en la literatura de confiabilidad/mantenibilidad.

Tabla 9.1. Función de mantenibilidad *M (t)* para distribuciones teóricas conocidas.

| **Distribución** | **Expresión** | **Dominio** |
|---|---|---|
| Exponencial | $1 - \exp(-t / Am)$ | $t \geq 0$ |
| Normal | $\Phi\ [(t - Am) / Bm]$ | $-\infty > t < +\infty$ |
| Log normal | $\Phi\ [(\ln (t - Cm) - Am) / Bm]$ | $t \geq Cm$, $Cm \geq 0$ |
| Weibull | $1 - \exp - [(t - Cm) / (Am - Cm)]^{Bm}$ | $t \geq Cm$, $Cm \geq 0$ |

## Ejemplo 9.1 Diseño de un sistema de mantenimiento industrial

Suponiendo que, dentro del diseño de un sistema de producción, se desea diseñar con la metodología del DA un sistema que mantenga los activos que permiten la operación del sistema de producción (Houshmand y Jamshidnezhad, 2002).

## Solución

El objetivo fundamental del mantenimiento es "preservar la función y la operabilidad, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, considerando aspectos de seguridad y procurando una inversión óptima de los recursos".

Con base en este objetivo, la necesidad que se establece dentro del primer dominio del Diseño Axiomático es: "Maximizar la función y la operabilidad, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, considerando aspectos de seguridad, procurando una inversión óptima de los recursos". Ver figura 9.9.

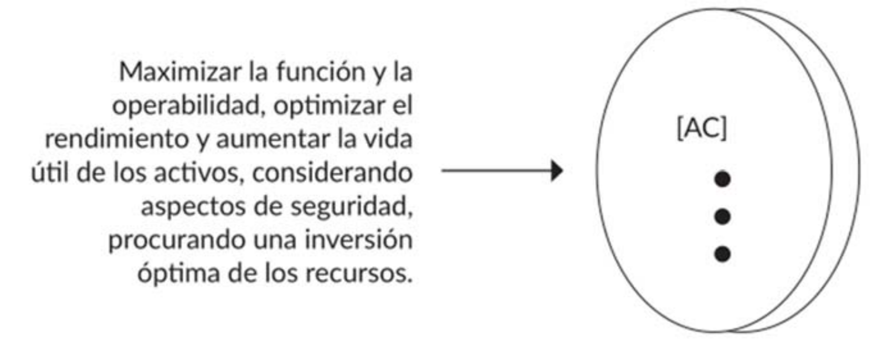



Figura 9.9. Necesidades del cliente. Fuente: Elaboración propia.

El primer requerimiento funcional puede ser establecido como sigue (ver figura 9.10).

- $RF_0$: Maximizar la función y la operabilidad de los activos, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, al costo mínimo, considerando aspectos de seguridad.

El parámetro de diseño (PD) que satisface RF0 es el siguiente:

- $PD_0$: Diseñar un Modelo de Optimización del Mantenimiento.

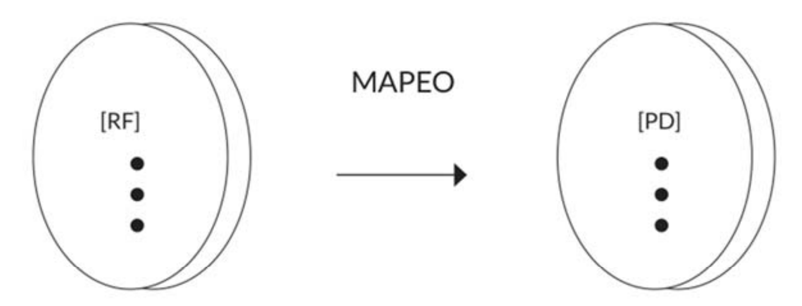



Figura 9.10. $RF_0$ y $PD_0$. Fuente: Elaboración propia.

## Descomposición de $RF_0$

Zigzagueando entre los dominios físicos y funcionales se establecen cinco requerimientos funcionales subordinados a $RF_0$: “Maximizar la función y la operabilidad de los activos, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, al costo mínimo, considerando aspectos de seguridad”, los RF se muestran en la Figura 9.11.

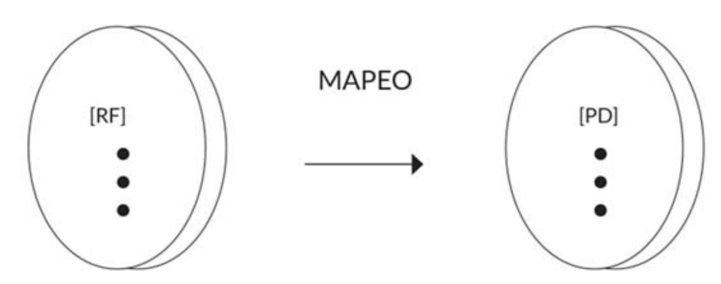



Figura 9.11. Mapeo del dominio funcional al dominio físico. Fuente: Elaboración propia.

- $RF_1$: “Maximizar la confiabilidad”. Este requerimiento está asociado directamente a la confiabilidad de los equipos, la cual se define como la probabilidad de que un sistema o componente, pueda funcionar correctamente fuera de falla, por un tiempo específico T. Por lo que al maximizar el tiempo entre las fallas que ocurren en un equipo o proceso estamos maximizando su función y optimizando su rendimiento.
- $RF_2$: “Minimizar el Tiempo de reparación”. Este requerimiento funcional está ligado a la habilidad que tiene un proceso o equipo de pasar del estado de falla al estado de funcionamiento, minimizar ese tiempo T incrementa el tiempo de funcionamiento por lo que a su vez se incrementa la disponibilidad de un equipo o proceso.
- $RF_3$: “Maximizar la Efectividad Total del Equipo”. Maximizar la efectividad se refiere, a la disciplina de medición del comportamiento de la efectividad de la planta, (o de una máquina o equipo). La efectividad de un equipo está determinada por la Disponibilidad de los equipos, la eficiencia de los equipos y el porcentaje de aceptación de los productos.
- $RF_4$: Minimizar Costos del Mantenimiento. Los Costos en el mantenimiento son de vital importancia, ya que el presupuesto establecido no es ilimitado y caer en la tentación de dar sobre-mantenimiento con el fin de evitar paros debe de ser eliminada a través del control de los costos.
- RF5**:** Minimizar Accidentes. Las tareas de mantenimiento deben de contemplar que la seguridad para el mantenedor y el usuario es primordial por lo que la seguridad es un requerimiento funcional indispensable en cualquier metodología de mejoramiento del mantenimiento.

La figura 9.12 muestra la descomposición de $FR_0$; dicha descomposición muestra el primer nivel jerárquico del diseño, así como la relación de dependencia existente entre los RF y los PD.

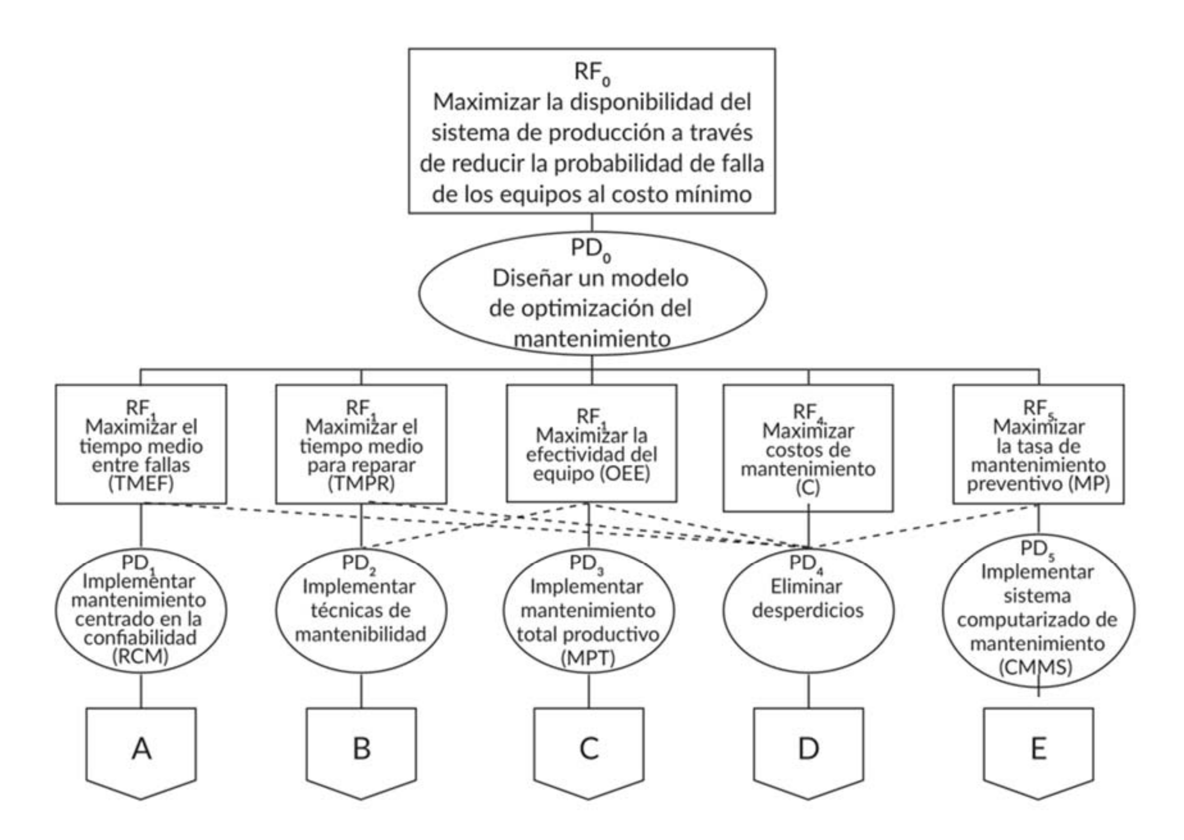



Figura 9.12. Descomposición de $FR_0$. Fuente: Elaboración propia.

La matriz de diseño del primer nivel es:

$$\begin{pmatrix} RF1 \\ RF2 \\ RF3 \\ RF4 \\ RF5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} PD1 \\ PD2 \\ PD3 \\ PD4 \\ PD5 \end{pmatrix}$$ Ecuación 9.12

La matriz de diseño es no acoplada debido a que $RF_1$, $RF_2$ y $RF_3$ son afectados por $PD_4$; además $RF_3$ es afectado por $PD_1$, $PD_2$ y $PD_4$. Ya que cada diseño desacoplado depende de la orden de los requerimientos la matriz debe ser modificada de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} RF4 \\ RF5 \\ RF2 \\ RF1 \\ RF3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & X & 0 \\ X & 0 & X & 0 & X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} PD4 \\ PD5 \\ PD2 \\ PD1 \\ PD3 \end{pmatrix}$$ Ecuación 9.13

Ahora la matriz es triangular y se puede deducir un orden para el proceso de diseño, por lo que la descomposición de los RF en niveles jerárquicos se desarrolla en el nuevo orden que ocupan en la matriz de diseño.

## Descomposición de $RF_4$

- $PD_4$ “Eliminar los desperdicios” este es un parámetro de diseño muy comprensible pero que no puede ser aplicado al nivel del área de operación del mantenimiento por lo que es necesaria la descomposición hasta un nivel jerárquico practico (ver figura 9.13).

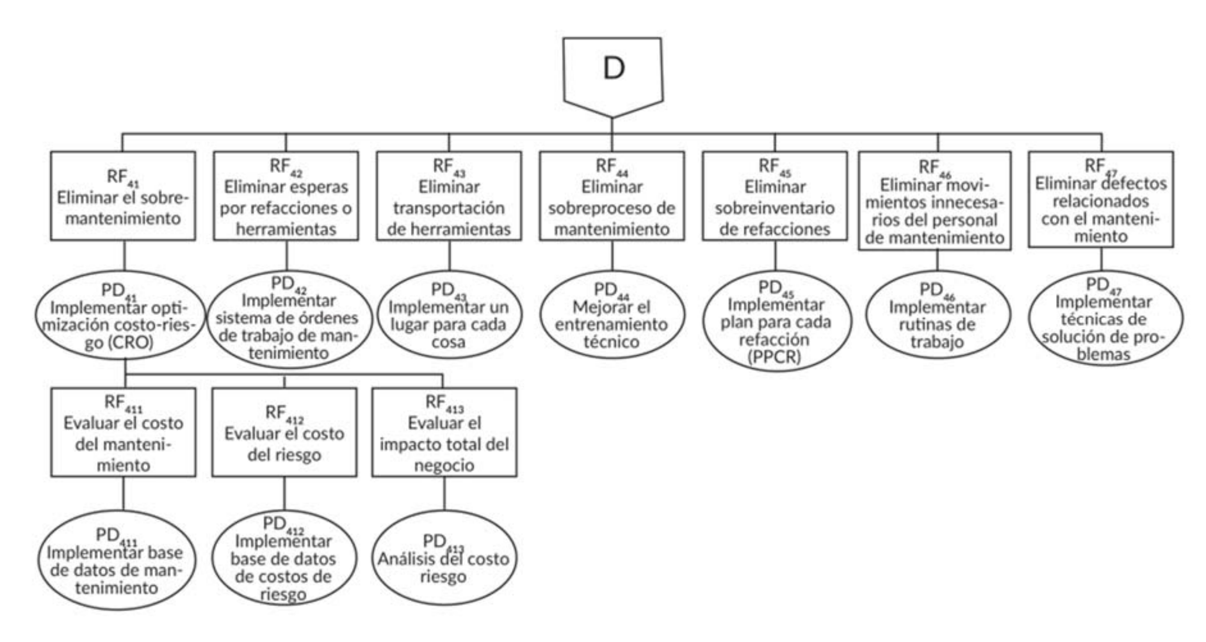



Figura 9.13 Descomposición de $RF_4$. Fuente: Elaboración propia.

- $RF_{41}$ “Eliminar el sobre-mantenimiento”. Indudablemente hacer más mantenimiento del necesario es un desperdicio sobre todo si al efectuarlo se gana poca o no demostrable mejora en la confiabilidad. Aquí la pregunta importante es, ¿está el personal de mantenimiento dando servicios a los equipos en lugar de permitir que corran hasta que fallen y después ser remplazados? Es común que los técnicos de mantenimiento verifiquen y reverifiquen equipos una y otra vez sin ningún resultado, o aún más, sin encontrar algún deterioro o falla.
- $RF_{42}$ “Eliminar esperas por refacciones o herramientas”. Este desperdicio se muestra cuando la gente de mantenimiento es forzada a estar esperando por refacciones o por algún llamado de emergencia. Cuando la gente debe estar activa y no lo está, no agrega ningún valor; eso es un desperdicio, y la falta de buena coordinación entre los elementos que forman una tarea de mantenimiento es una causa común de este desperdicio.
- $RF_{43}$ “Eliminar transportación de herramientas”. Cuando las herramientas o documentación necesarias para realizar un mantenimiento no están colocadas en el lugar más adecuado (cerca del lugar de uso) provoca transportaciones innecesarias que no agregan valor a la actividad del mantenimiento.
- $RF_{44}$ “Eliminar sobreproceso de mantenimiento”. En esta categoría están los típicos cuellos de botella del mantenimiento, como por ejemplo, un sistema de órdenes de trabajo casual o ineficiente, demasiado tiempo gastado en el llenado de formatos y reportes, así como un entrenamiento ineficiente.
- $RF_{45}$ “Eliminar sobreinventario de refacciones”. Frecuentemente, las organizaciones del mantenimiento tienden a exagerar en la cantidad de refacciones almacenadas en el almacén de partes. Con el paradigma en mente de que hay que tener cualquier refacción disponible por si las dudas, se crea el desperdicio más común y más costos dentro del área de mantenimiento.
- $RF_{46}$ “Eliminar movimientos innecesarios del personal de mantenimiento”. Es muy frecuente que el personal de mantenimiento realice movimientos que no son necesarios para la adecuada realización del mantenimiento, por ejemplo, el desarmar partes de una maquinaria que no es necesario remover para ejecutar la tarea.
- $RF_{47}$ “Eliminar defectos relacionados con el mantenimiento”. Cuando no se realiza bien un mantenimiento a la primera vez, aparece esta categoría de desperdicio, ya que el no efectuar el mantenimiento adecuadamente provoca retrabajar la actividad, rehaciendo repetidamente la reparación de un activo, o más aún, si se realiza un mantenimiento de manera defectuosa,

las consecuencias podrían ser totalmente contrarias al objetivo fundamental del mantenimiento, es decir: en lugar de preservar la vida útil de un equipo puede provocarse un mayor deterioro.

## Descomposición de $RF_{41}$

El segundo nivel de descomposición mostrado en la figura 9.13 establece PD fácilmente entendibles al nivel de los mantenedores del área de manufactura, con excepción del $PD_{41}$, por lo que fue necesario descomponer $RF_{41}$, “implementar optimización costo-riesgo” en un nivel jerárquico menor. Como muestra Durán (2003) en su trabajo *Nuevas tendencias del mantenimiento industrial la optimización costo riesgo*, es una metodología para determinar si es necesario o no realizar un mantenimiento basado en el riesgo asociado a la realización o no de dicha tarea.

En la optimización costo-riesgo, los criterios para la toma de decisión son:

- Costos que implica la actividad del mantenimiento.
- Relación costo-riesgo.
- Impacto total en el negocio

La figura 9.14 muestra la relación entre los criterios.

Los RF del tercer nivel como muestra la figura 9.13 son:

- $RF_{411}$: Evaluar el costo del mantenimiento.
- $RF_{412}$: Evaluar el costo del riesgo.
- $RF_{413}$: Evaluar el impacto total en el negocio.

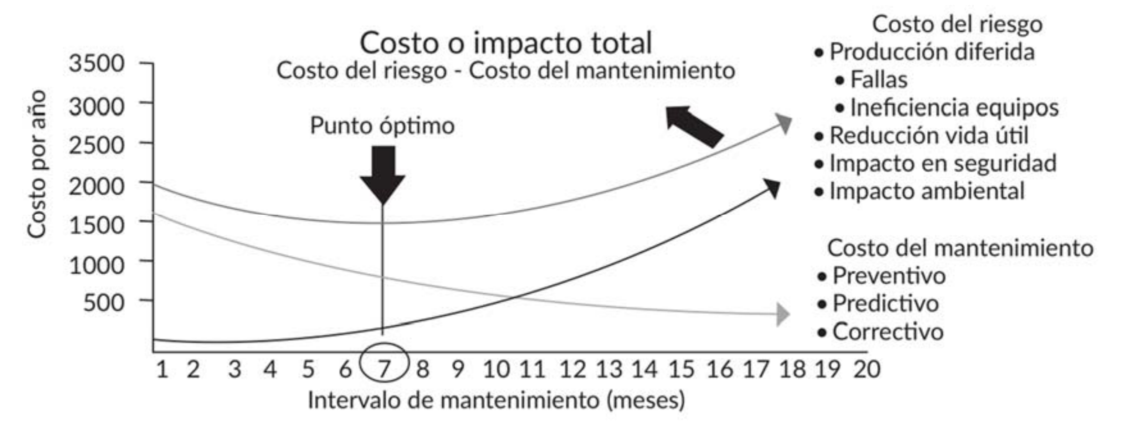



Figura 9.14. Optimización costo-riesgo. Adaptado de Durán José, Perdomo José, Sojo Luis, 2015.

# Descomposición de $RF_5$

- $RF_5$ “Minimizar accidentes”. La figura 9.15 muestra el segundo y tercer niveles jerárquicos de descomposición de este requerimiento. $RF_{51}$, “Minimizar accidentes al realizar tareas de mantenimiento”, implica realizar las actividades del mantenimiento sin cometer actos o condiciones inseguras.
- $RF_{52}$ “Minimizar errores de mantenimiento”. El error humano en el mantenimiento puede impactar la seguridad en varias formas. Las reparaciones erróneas, por ejemplo, pueden incrementar de manera sustancial el riesgo de un accidente, así como otras consecuencias mucho más severas.

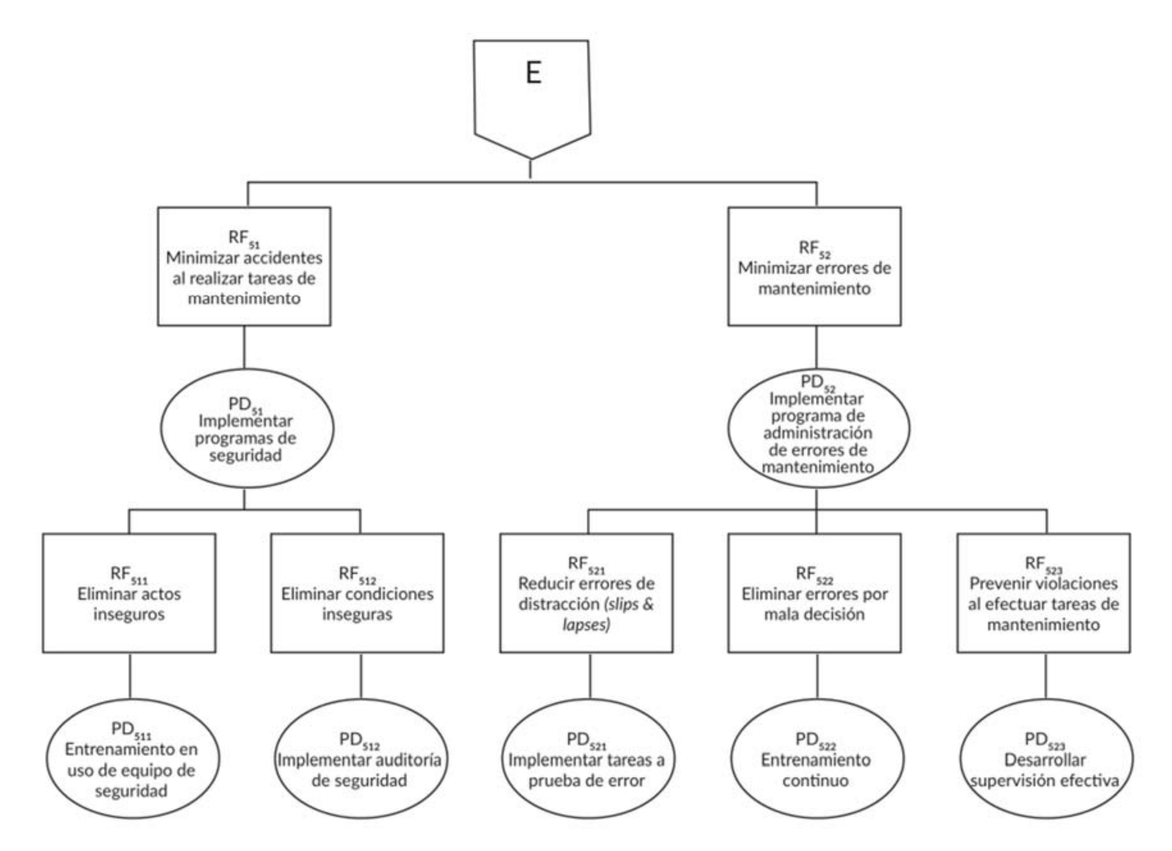



Figura 9.15. Descomposición de $RF_5$. Fuente: Elaboración propia.

Como con la mayoría de los tipos de trabajo, el alcance para el error humano en operaciones del mantenimiento es extenso. Estos pueden ir desde distracción y olvidos en importantes revisiones hasta desviaciones conocidas en procedimientos de trabajo con el fin de ahorrar tiempo. Algunos tipos de error humano pueden ser tan frecuentes que casi se convierten en costumbre y en prácticas aceptadas. Por ejemplo, los mantenedores pueden tener en el hábito de omitir chequeos finales durante un procedimiento del mantenimiento general. Otras formas de error humano pueden ocurrir raramente durante circunstancias excepcionales. Por ejemplo, los equipos de trabajo pueden diagnosticar mal la causa de una falla nueva.

## Descomposición de $RF_2$

– $RF_2$ "Minimizar el tiempo de reparación": es un requerimiento muy importante dentro del proceso de optimización del mantenimiento. El parámetro de diseño $PD_2$ asociado a este requerimiento es conocido como mantenibilidad, y aunque en la literatura podemos encontrar varias definiciones para tres enfoques, en este diseño lo definimos desde un enfoque basado en el tiempo empleado como una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada a lo largo de un periodo empleado en el mantenimiento, cuando este se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos.

Como $PD_2$ mantenibilidad no puede ser aplicado al nivel del área de operación del mantenimiento, es necesario descomponer el $RF_2$ en su siguiente nivel jerárquico, como se muestra en la figura 9.16.

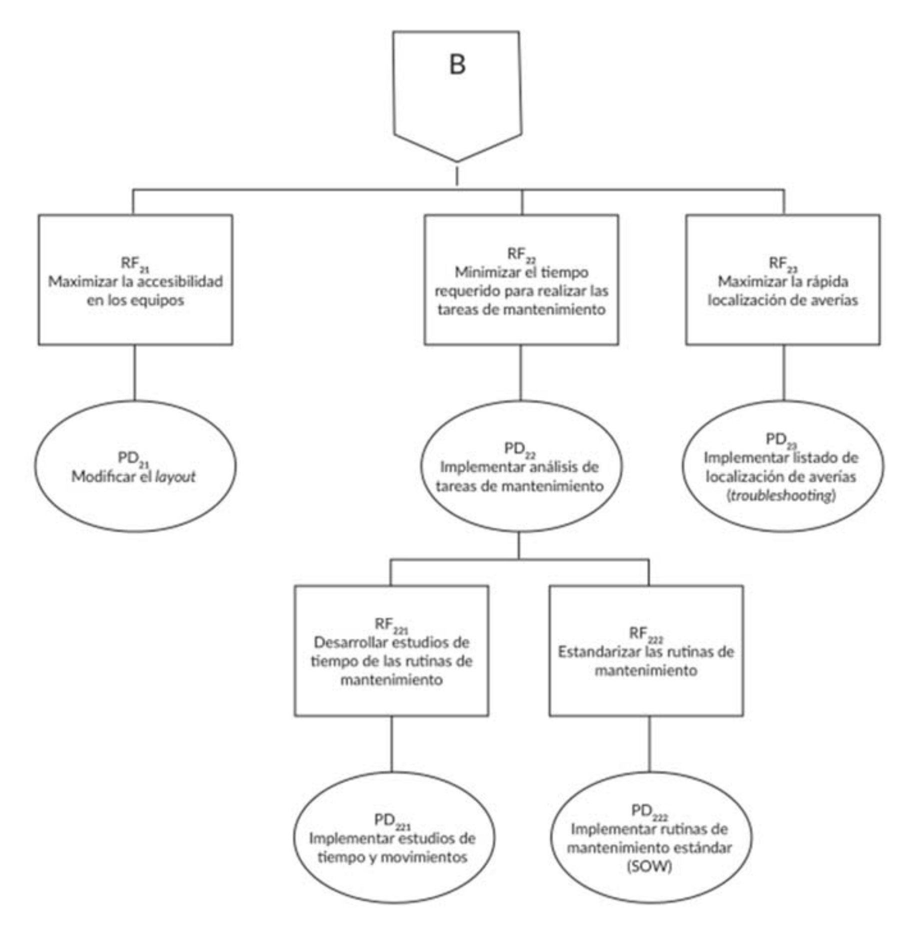



Figura 9.16 Descomposición de $RF_2$. Fuente: Elaboración propia

Como podemos ver, la figura 9.16 muestra a su vez el tercer nivel jerárquico de descomposición de $RF_2$, el cual está compuesto por el segundo nivel jerárquico de descomposición de $RF_{22}$, "Minimizar el tiempo requerido para realizar las tareas de mantenimiento".

## Descomposición de $RF_1$

- $RF_1$ "Maximizar la confiabilidad". Es un requerimiento relacionado directamente con la confiabilidad de los equipos. El parámetro de diseño asociado a este requerimiento.
- $PD_1$ "Implementar mantenimiento centrado en la confiabilidad" (mcc por sus siglas en inglés) es una técnica de mantenimiento que reconoce que el mantenimiento no puede hacer más que asegurar que los elementos físicos continúan consiguiendo su capacidad incorporada, confiabilidad inherente.

No se puede lograr mayor confiabilidad diseñada al interior de los activos y sistemas que la brindada por sus diseñadores. Cada componente tiene sus propias y únicas combinaciones de modos de falla, con sus propias intensidades de falla. Cada combinación de componentes es única y las fallas en un componente pueden conducir a fallas en otros. Cada sistema opera en un ambiente único consistente en ubicación, altitud, profundidad, atmósfera, presión, temperatura, humedad, salinidad, exposición a procesar fluidos o productos, velocidad, aceleración, entre otros.

Para aplicar este requerimiento operacional al nivel de los mantenedores de los equipos, es necesario realizar la descomposición como lo muestra la figura 9.17.

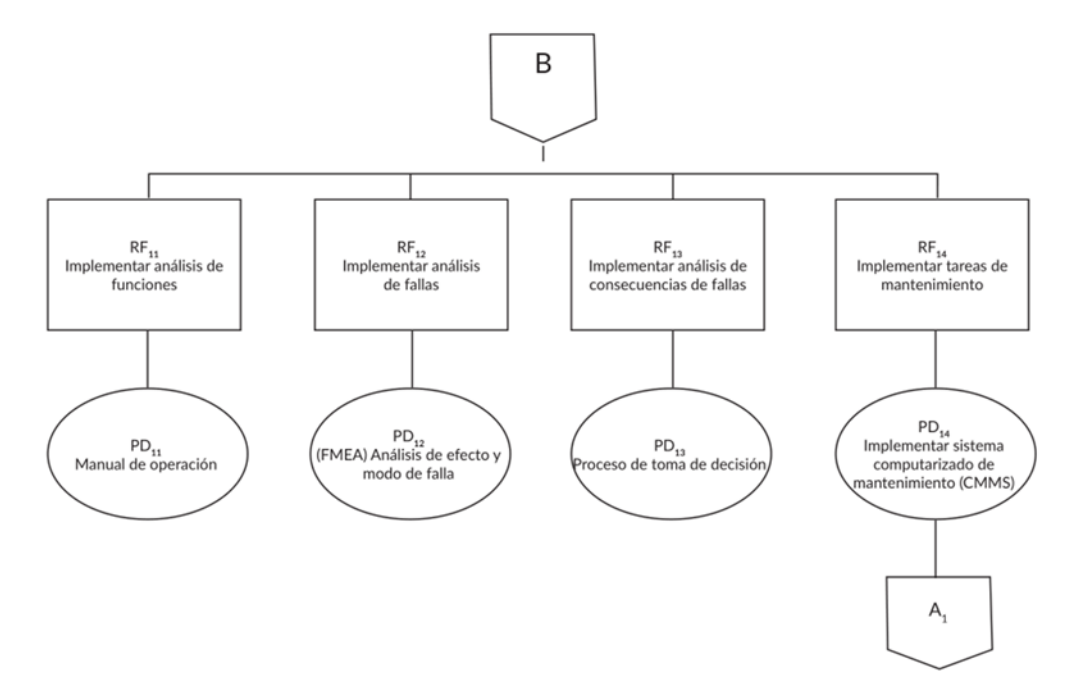



Figura 9.17 Descomposición de $RF_1$. Fuente: Elaboración propia.

- $RF_{11}$ “Implementar análisis de funciones”. Cada elemento de los equipos debe haberse adquirido para unos propósitos determinados; en otras palabras, deberá tener una función o funciones específicas. La pérdida total o parcial de estas funciones afecta a la organización en cierta manera. La influencia total sobre la organización depende de:
  - La función de los equipos en su contexto operacional.
  - El comportamiento funcional de los equipos en ese contexto.
- $RF_{12}$ “Implementar análisis de fallas”. Una vez que las funciones y los estándares de funcionamiento de cada equipo se hayan definido, el paso siguiente es identificar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones. Esto lleva al concepto de una falla funcional, que se define como la incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado.

El paso siguiente es tratar de identificar los modos de falla que tienen más posibilidad de causar la pérdida de una función. Esto permite comprender exactamente qué es lo que puede que se esté tratando de prevenir.

Cuando se está realizando este paso, es importante identificar cuál es la causa origen de cada falla. Esto asegura que no se malgasten tiempo y esfuerzo tratando los síntomas en lugar de las causas. Al mismo tiempo, cada modo de falla debe ser considerado en el nivel más apropiado, para asegurar que no se malgasta demasiado tiempo en el análisis de falla en sí mismo.

- $RF_{13}$ “Implementar análisis de consecuencias de fallas”. Al efectuar este análisis debemos considerar que existen cuatro grupos de consecuencias.
  - Consecuencias de las fallas no evidentes: las fallas que no son evidentes no tienen impacto directo, pero exponen a la organización a otras fallas con consecuencias serias, a menudo catastróficas. Un punto fuerte del MCC es la forma en que trata los fallas que no son evidentes, primero reconociéndolos como tales; en segundo lugar, otorgándoles una prioridad muy alta y finalmente adoptando un acceso simple, práctico y coherente con relación a su mantenimiento.
  - Consecuencias en la seguridad y el medio ambiente: una falla tiene consecuencias sobre la seguridad si puede afectar físicamente a alguien. Tiene consecuencias sobre

el medio ambiente si infringe las normas gubernamentales relacionadas con el medio ambiente. MCC considera las repercusiones que cada falla tiene sobre la seguridad y el medio ambiente, y lo hace antes de considerar la cuestión del funcionamiento. Pone a las personas por encima de la problemática de la producción.

- Consecuencias operacionales: una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (capacidad, calidad del producto, servicio al cliente o costos industriales en adición al costo directo de la reparación). Estas consecuencias cuestan dinero, y lo que cuesten sugiere cuánto se necesita gastar en tratar de prevenirlas.
- Consecuencias que no son operacionales: las fallas evidentes que caen dentro de esta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, por lo que el único gasto directo es el de la reparación.

- $RF_{14}$ “Implementar tareas de mantenimiento”. Es un requerimiento funcional enfocado en la función central del proceso de mantenimiento. El parámetro de diseño asociado a este requerimiento es $PD_{14}$, “implementar sistema computarizado de mantenimiento (CMMS)”. La figura 9.18 muestra la descomposición de este requerimiento funcional.
- $RF_{142}$ “Desarrollar rutinas y frecuencias de mantenimiento”. Este requerimiento es importante en el mantenimiento, pero a este nivel es muy básico, por lo que la figura 9.19 muestra la descomposición de este requerimiento.
- $RF_{1421}$ “Implementar tareas a condición”. La necesidad continua de prevenir ciertos tipos de falla y la incapacidad creciente de las técnicas tradicionales para hacerlo han creado los nuevos tipos de prevención de fallas. La mayoría de estas técnicas nuevas se basan en el hecho de que la mayor parte de las fallas dan alguna advertencia de que están a punto de ocurrir. Estas advertencias se conocen como fallas potenciales y se definen como las condiciones físicas identificables que indican que va a ocurrir una falla funcional o que está en el proceso de ocurrir.

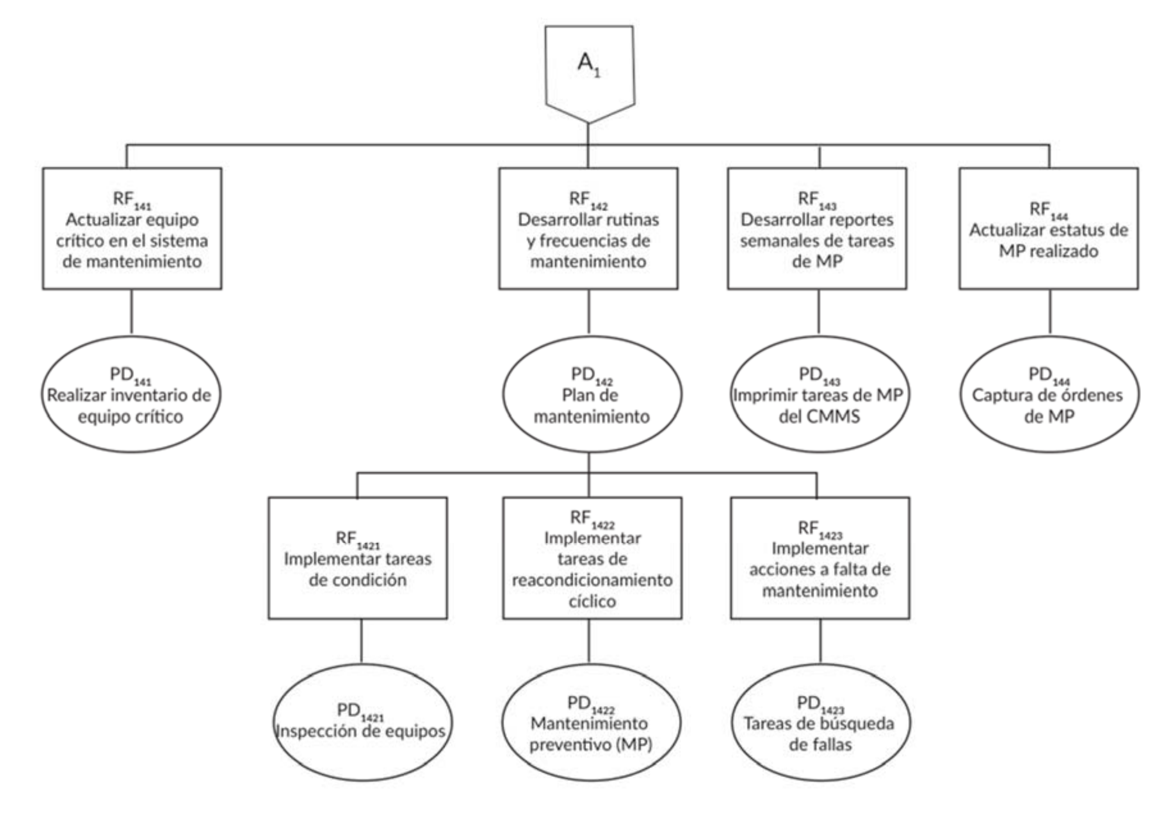



Figura 9.18. Descomposición de $RF_{14}$. Fuente: Elaboración propia.

Las nuevas técnicas se usan para determinar cuándo ocurren las fallas potenciales, de forma que se pueda hacer algo antes de que se conviertan en verdaderas fallas funcionales. Estas técnicas se conocen como tareas a condición, porque los elementos se dejan funcionando a condición de que continúen satisfaciendo los estándares de funcionamiento deseado.

- $RF_{1422}$ “Implementar tareas de reacondicionamiento cíclico”. Los equipos son revisados o sus componentes reparados a frecuencias determinadas, independientemente de su estado en ese momento.

  Si la falla no es detectable con tiempo suficiente para evitar la falla funcional, entonces la pregunta lógica es si es posible reparar el modo de falla del equipo para reducir la frecuencia (índice) de la falla.

  Algunas fallas son muy predecibles, aún si no pueden ser detectadas con suficiente tiempo. Estas pueden ser difíciles de detectar a través del monitoreo por condición a tiempo para evitar la falla funcional, o pueden ser tan predecibles que el monitoreo para lo evidente no es garantizado. Si no es práctico reemplazar componentes o restaurar de manera que queden en condición “como nuevos” a través de algún tipo de uso o acción basada en el tiempo, entonces es posible remplazar el equipo en su totalidad.

  Este tipo de mantenimiento es el que comúnmente se conoce como mantenimiento preventivo, el cual está totalmente basado en el tiempo.

- $RF_{1423}$ “Implementar acciones a falta de”. Además de preguntar si las tareas sistemáticas son técnicamente factibles, es necesario ver si vale la pena hacerlas. La respuesta depende de cómo reaccionen a las consecuencias de las fallas que pretenden prevenir. Al hacerse esta pregunta, estas acciones combinan la evaluación de la consecuencia con la selección de la tarea en un proceso único de decisión.

## Descomposición de $RF_3$

- $RF_3$ “Maximizar la efectividad del equipo”. La efectividad del equipo se refiere a un desempeño integral de un activo o proceso, y es integral porque establece que la efectividad está en función de tres requerimientos, los cuales componen el segundo nivel jerárquico de descomposición de este requerimiento: la disponibilidad, la eficiencia de funcionamiento y el índice de calidad. Ver figura 9.19.

  El OEE proporciona una medida de productividad real de la maquinaria y equipos, comparada con la Productividad ideal, durante un periodo específico.

- $RF_{31}$ “Maximizar la disponibilidad de los equipos”. Se mejora con la eliminación de averías, pérdidas en la preparación, ajuste y otros. A su vez, la disponibilidad está ligada a la habilidad de los mantenedores para restablecer rápidamente un equipo a su estado de funcionamiento, ya sea por alguna avería inesperada o por un mantenimiento planeado.

- $RF_{32}$ “Maximizar la eficiencia de funcionamiento de los equipos”. Puede ser mejorado con la eliminación de las pérdidas de velocidad y paradas menores.

- $RF_{33}$ “Maximizar el índice de calidad de los productos”. Se mejora con la eliminación de defectos de calidad en el proceso y durante la puesta en marcha.

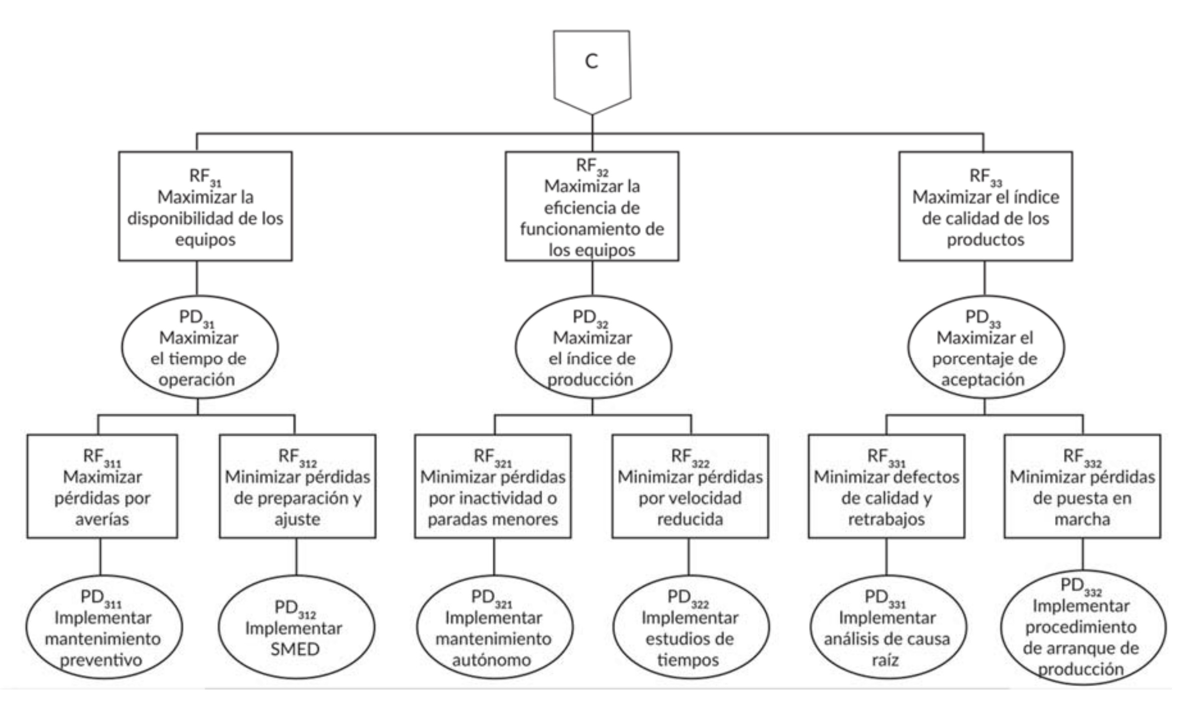



Figura 9.19. Descomposición de $RF_3$. Fuente: Elaboración propia.

La figura 9.19 muestra también el tercer nivel jerárquico de descomposición de $RF_3$, el cual está compuesto por los siguientes Requerimientos Funcionales**:**

- $RF_{311}$ "Minimizar las pérdidas por averías". Las averías causan dos problemas: pérdida de tiempo cuando se reduce la producción, y pérdidas de cantidad causadas por productos defectuosos. Las averías esporádicas, fallos repentinos, drásticos o inesperados del equipo son normalmente obvias y fáciles de corregir. Las averías menores de tipo crónico son a menudo ignoradas o descuidadas después de repetidos intentos fallidos de remediarlas.
- $RF_{312}$ "Minimizar pérdidas de preparación y ajuste". Cuando finaliza la producción de un elemento y el equipo se ajusta para atender los requerimientos de un nuevo producto, se producen pérdidas durante la preparación y ajuste al aparecer tiempos muertos y productos defectuosos como consecuencia del cambio.
- $RF_{321}$ "Minimizar pérdidas por inactividad o paradas menores". Una parada menor surge cuando la producción se interrumpe por una falla temporal o cuando la máquina está inactiva. Puede suceder que alguna pieza bloquee una parte de un transportador, causando inactividad en el equipo; otras veces, los censores alertados por productos defectuosos paran los equipos. Estos tipos de paradas temporales difieren claramente de las averías. La producción normal es restituida moviendo las piezas que obstaculizan la marcha y reajustando el equipo.
- $RF_{322}$ "Minimizar pérdidas por velocidad reducida". Las pérdidas de velocidad reducida se refieren a la diferencia entre la velocidad de diseño del equipo y la velocidad real de operación. Es típico que en la operación del equipo la pérdida de velocidad sea pasada por alto, aunque constituye un gran obstáculo para su eficacia. La meta debe ser eliminar la diferencia entre la velocidad de diseño y la velocidad real.
- $RF_{331}$ "Minimizar defectos de calidad y retrabajos". Los defectos de calidad y la repetición de trabajos son pérdidas de calidad causadas por el mal funcionamiento del equipo de producción. En general, los defectos esporádicos se corrigen fácil y rápidamente al normalizarse las condiciones de trabajo del equipo. La reducción de los defectos y averías crónicas requieren de un análisis cuidadoso, siguiendo el proceso establecido por la ruta de calidad, para remediarlos mediante acciones innovadoras.
- $RF_{332}$ "Minimizar pérdidas de puesta en marcha". Son pérdidas de rendimiento que se ocasionan en la fase inicial de producción, desde el arranque hasta la estabilización de la

máquina. El volumen de pérdidas varía con el grado de estabilidad de las condiciones del proceso, el nivel de mantenimiento del equipo, la habilidad técnica del operador, etcétera. Este tipo de pérdidas está latente, y la posibilidad de eliminarlas es a menudo obstaculizada por la falta de sentido crítico, que las acepta como inevitables.

## Restricciones

Las restricciones (Rs) establecidas para el diseño de este modelo son:

- $R_1$: Minimizar variación con el presupuesto establecido por la organización. Toda organización cuenta con un presupuesto para su operación y no es justificable solicitar un incremento o simplemente no ejercerlo debido a la optimización del mantenimiento.

  Aunque el modelo diseñado cuenta con un RF de costo, este está acotado por el presupuesto establecido, es decir, el modelo propuesto no debe exceder en costo más allá del presupuesto establecido por la organización.

- $R_2$: Minimizar incidentes ambientales (ISO 14000). En la actualidad, las organizaciones deben cumplir con regulaciones de carácter ambiental, por lo que las prácticas del mantenimiento deben cumplir dichas regulaciones, independientemente de la intención de optimizar el mantenimiento.

Estas dos restricciones son conocidas como restricciones de entrada, es decir, son restricciones dentro de las especificaciones del diseño. Las restricciones de entrada son usualmente expresadas como fronteras o límites dentro de los cuales el modelo debe ser diseñado; a diferencia de las RF, por definición, las restricciones no tienen que ser independientes una de otra. La tabla 9.2 muestra los RF y PD desarrollados en este diseño.

**Tabla 9.2. RF y sus correspondientes PD.**

| Requerimientos Funcionales | | Parámetros de Diseño | |
|---|---|---|---|
| $RF_0$ | Maximizar la función y la operabilidad de los activos, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, al costo mínimo, considerando aspectos de seguridad. | $PD_0$ | Diseñar un Modelo de Optimización del Mantenimiento |
| $RF_1$ | Maximizar la confiabilidad | $PD_1$ | Implementar Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad |
| $RF_{11}$ | Implementar análisis de funciones | $PD_{11}$ | Manual de operación |
| $RF_{12}$ | Implementar análisis de fallas. | $PD_{12}$ | (FMEA) Análisis de efecto y modo de falla |
| $RF_{13}$ | Implementar análisis de consecuencias de fallas | $PD_{13}$ | Proceso de toma de decisión |
| $RF_{14}$ | Implementar tareas de mantenimiento | $PD_{14}$ | Implementar Sistema Computarizado de Mantenimiento |
| $RF_{141}$ | Actualizar equipo critico en el sistema de mantenimiento | $PD_{141}$ | Realizar inventario de equipo critico |
| $RF_{142}$ | Desarrollar rutinas y frecuencias de mantenimiento | $PD_{142}$ | Plan de mantenimiento |
| $RF_{1421}$ | Implementar tareas a condición | $PD_{1421}$ | Inspección de equipos |
| $RF_{1422}$ | Implementar Tareas de Reacondicionamiento Cíclico | $PD_{1422}$ | Mantenimiento Preventivo |
| $RF_{1423}$ | Implementar acciones “a falta de” | $PD_{1423}$ | Tareas de búsqueda de fallas |
| $RF_{143}$ | Desarrollar reportes semanales de tareas de MP | $PD_{143}$ | Imprimir tareas de MP del CMMS |

| | Requerimientos Funcionales | | Parámetros de Diseño |
|---|---|---|---|
| $RF_{144}$ | Actualizar estatus del MP realizado | $PD_{144}$ | Captura de órdenes de MP |
| $RF_{2}$ | Minimizar el Tiempo de reparación. | $PD_{2}$ | Implementar Técnicas de Mantenibilidad |
| $RF_{21}$ | Maximizar la accesibilidad en los equipos | $PD_{21}$ | Modificar el *layout* |
| $RF_{22}$ | Minimizar el tiempo requerido para realizar las tareas de mantenimiento | $PD_{22}$ | Implementar análisis de tareas de mantenimiento |
| $RF_{221}$ | Desarrollar estudios de tiempo de las rutinas de mantenimiento | $PD_{221}$ | Implementar estudios de tiempos y movimientos |
| $RF_{222}$ | Estandarizar las rutinas de mantenimiento | $PD_{222}$ | Implementar rutinas de mantenimiento estándar (SOW) |
| $RF_{23}$ | Maximizar la rápida localización de averías | $PD_{23}$ | Implementar listado de localización de averías |
| $RF_{3}$ | Maximizar la Efectividad del equipo | $PD_{3}$ | Implementar Mantenimiento Total Productivo |
| $RF_{31}$ | Maximizar la disponibilidad de los equipos | $PD_{31}$ | Maximizar el tiempo de operación |
| $RF_{311}$ | Minimizar perdidas por averías | $PD_{311}$ | Implementar Mantenimiento Preventivo |
| $RF_{312}$ | Minimizar perdidas de preparación y ajuste | $PD_{312}$ | Implementar (SMED) |
| $RF_{32}$ | Maximizar la eficiencia de funcionamiento de los equipos | $PD_{32}$ | Maximizar el índice de producción |
| $RF_{321}$ | Minimizar perdidas por inactividad o paradas menores | $PD_{321}$ | Implementar Mantenimiento Autónomo |
| $RF_{322}$ | Minimizar perdidas por velocidad reducida | $PD_{322}$ | Implementar estudios de tiempos |
| $RF_{33}$ | Maximizar el índice de calidad de los productos | $PD_{33}$ | Maximizar el porcentaje de aceptación |
| $RF_{331}$ | Minimizar defectos de calidad y retrabados | $PD_{331}$ | Implementar análisis de causa raíz |
| $RF_{332}$ | Minimizar perdidas de puesta en marcha | $PD_{332}$ | Implementar procedimiento de arranque de producción |
| $RF_{4}$ | Minimizar Costos de mantenimiento | $PD_{4}$ | Eliminar Desperdicios |
| $RF_{41}$ | Eliminar el Sobremantenimiento | $PD_{41}$ | Implementar Optimización Costo riesgo (CRO). |
| $RF_{411}$ | Evaluar el costo del mantenimiento | $PD_{411}$ | Implementar base de datos de costos de mantenimiento |
| $RF_{412}$ | Evaluar el costo del riesgo | $PD_{412}$ | Implementar base de datos de costos de los riesgos |
| $RF_{413}$ | Evaluar el impacto total en el negocio | $PD_{413}$ | Análisis del costo riesgo |
| $RF_{42}$ | Eliminar Esperas por refacciones o herramientas | $PD_{42}$ | Implementar sistema de órdenes de trabajo de mantenimiento |
| $RF_{43}$ | Eliminar Transportación de herramentales | $PD_{43}$ | Implementar un lugar para cada cosa |
| $RF_{44}$ | Eliminar sobre proceso de mantenimiento | $PD_{44}$ | Mejorar el entrenamiento técnico |
| $RF_{45}$ | Eliminar sobre inventario de refacciones | $PD_{45}$ | Implementar Plan para cada Refacción |
| $RF_{46}$ | Eliminar movimientos innecesarios del personal de Mantenimiento | $PD_{46}$ | Implementar rutinas de trabajo |
| $RF_{47}$ | Eliminar Defecto relacionados con el Mantenimiento | $PD_{47}$ | Implementar técnicas de solución de problemas |
| $RF_{5}$ | Minimizar accidentes. | $PD_{5}$ | Implementar políticas de seguridad |
| $RF_{51}$ | Minimizar accidentes al realizar tareas de mantenimiento | $PD_{51}$ | Implementar programa de seguridad |

| Requerimientos Funcionales | | Parámetros de Diseño | |
|---|---|---|---|
| $RF_{511}$ | Eliminar actos inseguros | $PD_{511}$ | Entrenamiento en uso de equipo de seguridad |
| $RF_{512}$ | Eliminar condiciones inseguras | $PD_{512}$ | Implementar auditoria de seguridad |
| $RF_{52}$ | Minimizar errores de Mantenimiento | $PD_{52}$ | Implementar programa de administración de errores de mantenimiento |
| $RF_{521}$ | Reducir errores de distracción (*slips* y *lapses*) | $PD_{521}$ | Implementar tareas a prueba de error |
| $RF_{522}$ | Eliminar errores por mala decisión | $PD_{522}$ | Entrenamiento continuo |
| $RF_{523}$ | Prevenir violaciones al efectuar tareas de mantenimiento | $PD_{523}$ | Desarrollar supervisión efectiva |

## RESUMEN

El DA es una herramienta de utilidad para la preservación de la función en los procesos de manufactura, así como de la optimización del rendimiento de los activos necesarios para la fabricación de productos. El DA puede ser usado dentro de los Requerimientos Funcionales para maximizar la confiabilidad y la efectividad del equipo, así como minimizar los tiempos de reparación, los costos de mantenimiento y los accidentes.

## REFERENCIAS


AMENDIOLA, L. (1994). *Modelos mixtos de confiabilidad.* Datastream: Valencia. España.

COCHRAN, D. S., y Reynal, V. A. (1996). *Axiomatic design of manufacturing systems*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

DE los Ángeles Chan Yah, Rossana (2013). Mantenimiento productivo total (MPT). El mundo de la ingeniería industrial. Recuperado de http://rochichan.blogspot.mx/2013/01/mantenimiento-productivo-total-tpm.html.

DURÁN, J., Perdomo, J., y Sojo, L. (2015). Aplicación de la técnica "optimización costo-riesgo". The Woodhouse Partnership LTD. Recuperado de http://documents.mx/documents/aplicacion-de-la-tecnica-optimizacion-costo-riesgo.html.

DUNN, S. (1998). Reinventing the maintenance process, Queensland Maintenance Conference. Recuperado a partir de http://www.plant-maintenance.com/tzd.shtml.

DURÁN, J. B. (2003). Nuevas tendencias del mantenimiento en la industria eléctrica. *SIMSE-CIER,* Cartagena, Colombia.

FELD, W. M. (2001). *Lean manufacturing: tools, techniques, and how to use them*. New York, NY: St. Lucie Press.

GOTERA Valbuena, Eddin Rafael. ¿Qué es lo último que hemos aplicado en mantenimiento? Recuperado de http://www.monografias.com/trabajos13/mante/mante.shtml#ce.

HOUSHMAND, M., y Jamshidnezhad, B. (2002). Conceptual design of lean production systems through an axiomatic approach. En *Proceedings of ICAD2002 Second International Conference on Axiomatic Design*. Cambridge, MA.

JONES, R. (1995). *Risk-based management.* N. Y., USA: Elsevier.

KNEZEVIC, Jezdimir (1996). Mantenibilidad. Isdefe. Madrid. Recuperado de http://es.slideshare.net/franier/8710460-mantenibilidad.

MOHAMED Ben-Daya, S. O.-K. (2009). *Handbook of maintenance management and engineering*. Londres: Springer Science & Business Media.

MOUBRAY, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press.

SUH, N. P. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press.

UNIVERSIDAD Católica de Chile. El mantenimiento como fuente de rentabilidad. Recuperado de http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno06/OED/mantenimiento.htm.




Servicio de Publicaciones
Biblioteca Universitaria
C/ Piscinas, 1
26006 Logroño (La Rioja)
Teléfono: 941 299 187

**http://publicaciones.unirioja.es**
**www.unirioja.es**